



Alexandre Raphaël da Piedade Castelhão

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo do Acabamento Superficial e dos Desvios Dimensionais em Provetes Produzidos por Manufatura Aditiva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Bruno Alexandre Rodrigues
Simões Soares, Professor Auxiliar Convidado, Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: Professora Doutora Carla Maria Moreira
Machado, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2018

Alexandre Raphaël da Piedade Castelhão

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Estudo do Acabamento Superficial e dos
Desvios Dimensionais em Provetes
Produzidos por Manufatura Aditiva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Bruno Alexandre Rodrigues
Simões Soares, Professor Auxiliar Convidado, Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: Professora Doutora Carla Maria Moreira
Machado, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Setembro 2018

Estudo do Acabamento Superficial e dos Desvios Dimensionais em Provetes Produzidos por Manufatura Aditiva

Copyright © 2018 Alexandre Raphaël da Piedade Castelhão

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar a minha gratidão ao meu orientador, o Professor Bruno Soares, por toda a disponibilidade, ajuda e apoio facultado durante o desenvolvimento desta dissertação.

Agradecer à minha co-orientadora, a Professora Carla Machado, por toda a ajuda no tratamento estatístico dos resultados.

Gostaria ainda de agradecer ao Professor João Fradinho pelo facto de estar sempre disponível e pronto a esclarecer qualquer dúvida que surgisse e ao Professor António Mourão por todas as sugestões que deu no decorrer desta dissertação.

E, por último, mas não menos importante, um grande obrigado aos meus colegas de curso por todo o companheirismo manifestado, à minha namorada, por toda a paciência e apoio e à minha família que esteve sempre presente, incentivando e apoiando.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo comparar o acabamento superficial e os desvios dimensionais obtidos em relação à cota nominal em provetes produzidos em PLA por *Fused Deposition Modeling* (FDM) em duas impressoras 3D da marca Blocks, a Blocks Zero e a Blocks One. Para tal, foram realizados dois estudos diferentes. No estudo do acabamento superficial foi estudada a influência da orientação do provete, para ter em conta o efeito escada (característico da manufatura aditiva), juntamente com certos parâmetros de impressão (espessura de camada, percentagem de *infill*, velocidade de impressão e temperatura de extrusão) no acabamento superficial obtido. No estudo dos desvios foi avaliada a influência da dimensão do provete juntamente com os mesmos parâmetros acima descritos, tendo como resposta os desvios em relação à cota nominal em três direções, correspondentes aos três eixos ortogonais das impressoras.

Para tal foi aplicada a Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) usando o *Central Composite Design* (CCD) que possibilitou a obtenção de modelos empíricos polinomiais de segundo grau que relacionam as variáveis acima mencionadas com o acabamento superficial e os desvios dimensionais obtidos. Uma vez obtidos os modelos empíricos, foi realizada uma comparação entre as impressoras, sendo que de uma forma geral, no estudo do acabamento superficial, a impressora Blocks One obteve melhores resultados que a Blocks Zero enquanto que nos estudos dos desvios os resultados obtidos pela avaliação dos provetes produzidos na Blocks Zero geraram resultados fracos, não proporcionando as melhores condições para poder comparar as duas impressoras.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Planeamento de experiências (DoE), Metodologia da Superfície de Resposta (RSM), Acabamento Superficial, FDM

Abstract

The following dissertation aims to compare both surface finishing and the deviations obtained relative to the nominal size in specimens produced in PLA by Fused Deposition Modeling (FDM) using two 3D printers, Blocks Zero and Blocks One. There were two different studies performed in this assessment. Firstly, the influence of the specimen's orientation and the printing parameters (layer thickness, infill percentage, printing speed and extrusion temperature) on the obtained surface finishing was studied. Secondly, the impacts of the specimen's dimension and the same printing parameters on the deviation from the nominal size were analyzed.

To perform an accurate comparison between the printers, Response Surface Methodology was applied using the Central Composite Design, thus allowing for obtaining empirical polynomial models of second degree which relate the aforementioned factors to the surface finishing and deviations obtained. Using those empirical models, the two printers were compared providing the following findings: Regarding the surface finishing the Blocks One printer performed significantly better than Blocks Zero. On the other hand, considering the deviations study, the results from the Blocks Zero printer didn't provide best conditions to perform a comparison test, therefore not providing clear conclusions.

Keywords: Additive Manufacturing, Design of Experiments (DoE), Response Surface Methodology (RSM), Surface Finishing, FDM

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura do Documento	2
2	Estado da Arte.....	4
2.1	Manufatura Aditiva	4
2.2	Tecnologias de Manufatura Aditiva.....	5
2.2.1	<i>Material Extrusion</i>	5
2.2.2	<i>Vat Polymerization</i>	7
2.2.3	<i>Polyjet</i>	8
2.2.4	<i>Sheet Lamination</i>	9
2.2.5	<i>Direct Energy Deposition</i>	10
2.2.6	<i>Powder Bed Fusion</i>	11
2.2.7	<i>Binder Jetting - 3D Printing (3DP)</i>	13
2.3	Vantagens da Manufatura Aditiva	14
2.4	Desvantagens da Manufatura Aditiva	16
2.5	Breve História da Manufatura Aditiva.....	17
2.6	Mercado	17
2.7	Aplicações.....	18
2.8	Fases do Processo de Manufatura Aditiva	19
3	Metodologia	23
3.1	Introdução	23
3.2	<i>Design Of Experiments (DoE)</i>	24
3.3	Identificação das variáveis significativas.....	25
3.4	Análise de Variância (ANOVA).....	26
3.5	Metodologia da Superfícies de Resposta (RSM)	29
3.6	<i>Central Composite Design</i>	29

4	Procedimento Experimental	35
4.1	Materiais	35
4.2	Equipamento utilizado na impressão dos provetes	36
4.2.1	<i>Blocks Zero</i>	36
4.2.2	<i>Blocks One</i>	37
4.2.3	<i>Principais Diferenças</i>	38
4.3	Estabelecimento das variáveis a estudar	39
4.4	Provetes utilizados	40
4.5	Etapas do Procedimento Experimental	41
4.6	Planeamento das experiências.....	42
4.6.1	<i>Screening</i>	42
4.6.2	<i>Metodologia da Superfície de Resposta</i>	45
4.7	Avaliação Dimensional dos Provetes.....	48
4.8	Avaliação do Acabamento Superficial.....	48
4.8.1	<i>Introdução teórica</i>	48
4.8.2	<i>Procedimento experimental</i>	49
5	Discussão dos Resultados Experimentais	51
5.1	Experiência de <i>Screening</i>	51
5.2	Metodologia da Superfície de Resposta.....	52
5.2.1	<i>Acabamento Superficial</i>	53
5.2.2	<i>Estudo dos Desvios Dimensionais</i>	73
6	Conclusão.....	87
6.1	Conclusões	87
6.1.1	<i>Estudos do acabamento superficial</i>	87
6.1.2	<i>Estudos dos desvios dimensionais</i>	89
6.2	Propostas de trabalhos futuros	90
7	Referências Bibliográficas.....	91
	ANEXOS.....	95

Anexo A	97
Anexo B	103
Anexo C	111
Anexo D	121

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Rotação da peça em torno do eixo Y de forma a estudar a evolução das rugosidades nas faces A e B	2
Figura 2.1 – Sete processos de manufatura aditiva	5
Figura 2.2 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora FDM	6
Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLA (esquerda) e de uma impressora DLP (direita)	7
Figura 2.4 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora Polyjet	8
Figura 2.5 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora LOM	9
Figura 2.6 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora LENS	11
Figura 2.7 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLS	12
Figura 2.8 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora Binder Jetting	13
Figura 2.9 - Custo do produto versus o tempo	15
Figura 2.10 - Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto	16
Figura 2.11 - Aplicações da MA por parte das empresas (Estudo Sculpteo)	18
Figura 2.12 - Benefícios apontados pelas empresas desde que começaram a utilizar a MA (Estudo Sculpteo).	19
Figura 2.13 - Diagrama de etapas do processo de manufatura aditiva.	19
Figura 2.14 - Defeito de "degraus" ou “escada”	20
Figura 2.15 - Exemplo de defeitos originados devido ao mau posicionamento da peça	21
Figura 2.16 - Anisotropia característica de peças impressas em impressoras FDM	21
Figura 3.1 - Exemplo de um sistema/processo	23
Figura 3.2 Pontos de um <i>Central Composite Design</i>	30
Figura 3.3 CCD para k = 2 variáveis.	30
Figura 3.4 CCD para k = 3 variáveis.	31
Figura 4.1 - Gama de materiais disponíveis para impressoras FDM.	35
Figura 4.2 - Impressora Blocks Zero	36
Figura 4.3 - Impressora Blocks One	37

Figura 4.4 - Forma como opera a impressora Blocks Zero (Core XZ).....	38
Figura 4.5 - Forma como opera a impressora Blocks One (Core XY)	39
Figura 4.6 – Representação dos provetes produzidos para a experiência de <i>screening</i> no programa CURA, a) Orientação: 0°, b) Orientação: 45°	40
Figura 4.7 - Representação dos provetes usados no estudo das rugosidades no programa CURA a) Orientação:95° b) Orientação:15° c) Orientação:45° d) Orientação:75°e) Orientação: -5°	41
Figura 4.8 - Representação dos provetes usado no estudo dos desvios dimensionais no programa CURA. a)5mm b)20mm c)35mm d)50mm e)65mm.	41
Figura 4.9 - Sequência de imagens que representa as várias etapas do procedimento experimental bem como a ordem em que estas foram realizadas.....	42
Figura 4.10 - Paquímetro digital utilizado na avaliação dimensional dos provetes.....	48
Figura 4.11 Ilustração de 4 perfis de rugosidade diferentes com o mesmo Ra. a) soma de 10 curvas sinusoidais, b) curva sinusoidal pura, c) e d) curvas com padrão dente de serra com alta e baixa frequência, respetivamente [39].....	49
Figura 4.12 - Rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf PS 10.....	50
Figura 5.1 – Gráfico de Pareto para a Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero)	54
Figura 5.2 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade B (Impressora: Blocks Zero)	54
Figura 5.3 - Superfície de resposta para a Rugosidade A em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks Zero).....	55
Figura 5.4 - Superfície de resposta para a Rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks Zero).....	56
Figura 5.5 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero).....	58
Figura 5.6 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade B (Impressora: Blocks Zero).....	58
Figura 5.7 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade A (Impressora: Blocks One).....	60
Figura 5.8 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade B (Impressora: Blocks One).....	60
Figura 5.9 - Superfície de resposta para a Rugosidade A em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks One).....	61

Figura 5.10 - Superfície de resposta para a Rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks One).....	62
Figura 5.11 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade A (Impressora: Blocks One)	63
Figura 5.12 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade B (Impressora: Blocks One).....	64
Figura 5.13 - Comparação dos resultados obtidos pelas duas impressoras para a resposta Rugosidade A	66
Figura 5.14 - Efeito de escada observado (orientação a -5°)	66
Figura 5.15 - Comparação dos resultados obtidos pelas duas impressoras para a resposta Rugosidade B	67
Figura 5.16 - Evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação, mantendo a espessura constante no nível 0 (Impressora: Blocks Zero)	68
Figura 5.17 - Evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação, mantendo a espessura constante no nível 0 (Impressora: Blocks One)	69
Figura 5.18 - Rotação de 45° do cubo	69
Figura 5.19 - Rugosidades obtidas nas duas faces em estudos mantendo a orientação sempre no nível 0 (45°) e variando o valor da espessura de camada (Impressora: Blocks Zero)	71
Figura 5.20 - Rugosidades obtidas nas duas faces em estudos mantendo a orientação sempre no nível 0 (45°) e variando o valor da espessura de camada (Impressora: Blocks One)	71
Figura 5.21 - Gráfico de <i>Pareto</i> para o Desvio X (Impressora: Blocks Zero).....	74
Figura 5.22 - Gráfico de <i>Pareto</i> para o Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)	74
Figura 5.23 - Gráfico de <i>Pareto</i> para o Desvio Z (Impressora: Blocks Zero).....	75
Figura 5.24 - Representação do modelo matemático para prever o Desvio X	75
Figura 5.25 - Superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks Zero)	76
Figura 5.26 - Superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da velocidade de impressão (Impressora: Blocks Zero)	77
Figura 5.27 - Gráfico de <i>Pareto</i> para o Desvio X (Impressora: Blocks One)	80
Figura 5.28 - Gráfico de <i>Pareto</i> para o Desvio Y (Impressora: Blocks One)	80

Figura 5.29 - Gráfico de Pareto para o Desvio Z (Impressora: Blocks One).....	80
Figura 5.30 - Superfície de resposta para o Desvio X em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks One)	81
Figura 5.31 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks One)	82
Figura 5.32 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função da dimensão e da velocidade de impressão (Impressora: Blocks One)	83
Figura 5.33 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função em função da velocidade de impressão e da espessura de camada (Impressora: Blocks One)	84
Figura 5.34 - Representação do modelo matemático para prever o Desvio Z.....	85
Figura 6.1 - Evolução do efeito de escada	87
Figura 6.2 - Evolução da rugosidade média na face B da peça em função do ângulo que a face faz com a plataforma de extrusão	88

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens do FDM.....	6
Tabela 2.2 Vantagens e desvantagens da Vat Polymerization.....	8
Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do PolyJet.....	9
Tabela 2.4 Vantagens e desvantagens do LOM.....	10
Tabela 2.5 Vantagens e desvantagens da Direct Energy Deposition.....	11
Tabela 2.6 Vantagens e desvantagens da Powder Bed Fusion	12
Tabela 2.7 Vantagens e desvantagens do Binder Jetting	14
Tabela 3.1 - Distribuição t-Student ($\alpha=0,05$).....	25
Tabela 3.2 - Tabela de análise de variância (ANOVA)	26
Tabela 3.3 - Distribuição F de Fisher. ($\alpha = 0.05$)	28
Tabela 3.4 Tipos de CCD.....	31
Tabela 3.5 Valores de α para que o CCD seja rotacional.	32
Tabela 4.1 - Características do PLA utilizado na impressão dos provetes	36
Tabela 4.2 - Características e propriedades de impressão da impressora Blocks Zero	37
Tabela 4.3 - Características e propriedades de impressão da impressora Blocks One	38
Tabela 4.4 - Matriz planejamento fatorial 25 representando o aumento e a diminuição dos parâmetros a avaliar (Estudo do acabamento superficial).....	44
Tabela 4.5 - Matriz planejamento fatorial 24 representando o aumento e a diminuição dos parâmetros a avaliar (Estudo dos desvios dimensionais)	45
Tabela 4.6 - Valores usados para cada nível das variáveis usadas no estudo do acabamento superficial	46
Tabela 4.7 - Matriz planejamento de experiências para um CCD com 3 variáveis (Estudo do acabamento superficial)	46
Tabela 4.8 - Valores usados para cada nível das variáveis usadas no estudo dos desvios dimensionais	47
Tabela 4.9 - Matriz planejamento de experiências para um CCD com 4 variáveis (Estudo dos desvios dimensionais).....	47

Tabela 4.10 - Classes de rugosidade e correspondentes valores da rugosidade	49
Tabela 5.1 - Respostas a estudar na experiência final	52
Tabela 5.2 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero)	53
Tabela 5.3 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B (Impressora: Blocks Zero)	53
Tabela 5.4 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B usando a impressora Blocks Zero	57
Tabela 5.5 - Testes realizados na validação dos modelos empíricos para as rugosidades obtidas em provetes produzidos na impressora Blocks Zero	57
Tabela 5.6 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A (Impressora: Blocks One)	59
Tabela 5.7 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B (Impressora: Blocks One)	59
Tabela 5.8 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B usando a impressora Blocks One	62
Tabela 5.9 - Testes realizados na validação dos modelos empíricos para as rugosidades obtidas em provetes produzidos na impressora Blocks One	63
Tabela 5.10 - Resultados da comparação das rugosidades nas duas impressoras variando a espessura de camada e a orientação	65
Tabela 5.11 - Resultados obtidos pelo modelo empírico variando a orientação e mantendo a espessura de camada constante	68
Tabela 5.12 - Resultados da comparação das rugosidades nas duas impressoras variando a espessura de camada e mantendo a variável orientação sempre no nível zero	70
Tabela 5.13 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X (Impressora: Blocks Zero)	73
Tabela 5.14 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)	73
Tabela 5.15 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)	73
Tabela 5.16 - Modelos matemáticos para prever os desvios em relação à cota nominal (Impressora: Blocks Zero)	78
Tabela 5.17 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X (Impressora: Blocks One)	79
Tabela 5.18 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y (Impressora: Blocks One)	79
Tabela 5.19 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z (Impressora: Blocks One)	79
Tabela 5.20 - Modelos matemáticos para prever os desvios em relação à cota nominal (Impressora: Blocks One)	85

Lista de Abreviaturas e Símbolos

3DP	<i>Three-Dimensional Printing</i>
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABS	Estireno Acrilonitrilo Butadieno
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CDLP	<i>Continuous Direct Light Processing</i>
D	Dimensão
Desvio X	Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo x da impressora
Desvio Y	Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo y da impressora
Desvio Z	Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo z da impressora
DLP	<i>Direct Light Projection</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
E_c	Espessura de Camada
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
LENS	<i>Laser Engineering Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MA	Manufatura Aditiva
RSM	Metodologia da Superfície de Resposta
OFAT	<i>One Factor at a Time</i>

PC	Policarbonato
PLA	Ácido Polilático
PR	Prototipagem Rápida
R^2	Coefficiente de Correlação
R_a	Rugosidade Média
R_A^2	Coefficiente de Correlação Ajustado
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
Rugosidade A	Rugosidade média medida na face A do provete
Rugosidade B	Rugosidade média medida na face B do provete
SL	<i>Stereolithography</i>
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Standart Triangles Language</i>
T	Temperatura de Extrusão
v	Velocidade de Impressão

1

Introdução

1.1 Motivação

Atualmente a economia global em que nos encontramos é caracterizada por uma elevada competitividade comercial e industrial havendo uma necessidade crescente na inovação, desenvolvimento e na redução do tempo inerente ao desenvolvimento de novos produtos. A velocidade de obtenção de produtos inovadores representa uma importante vantagem competitiva em qualquer indústria. Posto isto, o recurso a protótipos, materializando assim uma ideia, constitui o primeiro objetivo de diversas atividades industriais sendo uma mais valia no que toca ao planeamento de produção.

A Manufatura Aditiva oferece rapidez, liberdade geométrica, qualidade de produção, baixo custo e flexibilidade [1], sendo desta forma um método eficaz para a produção de protótipos que servem como uma ferramenta de aprendizagem, enriquecem a comunicação entre os vários departamentos de uma empresa e servem também como ferramenta de integração, garantindo que todos os componentes funcionam como esperado [2].

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste na realização de um estudo comparativo de provetes produzidos por duas impressoras 3D da empresa Blocks, a Blocks Zero e a Blocks One, ambas de tecnologia FDM. Pretende-se estudar a influência da orientação, Figura 1.1, juntamente com certos parâmetros de impressão (espessura de camada, percentagem de *infill*, velocidade de impressão e temperatura de extrusão) no acabamento superficial das peças produzidas.

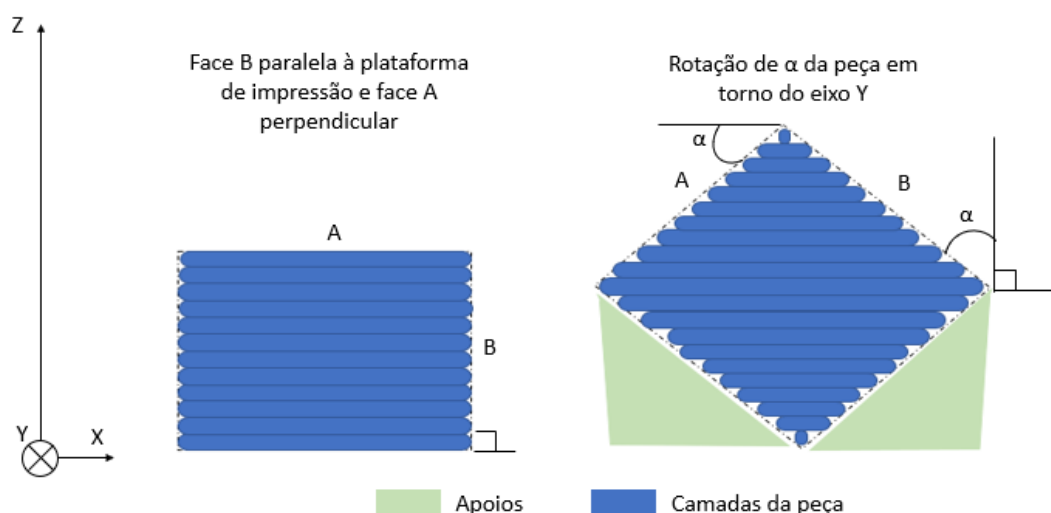


Figura 1.1 - Rotação da peça em torno do eixo Y de forma a estudar a evolução das rugosidades nas faces A e B

Para além deste estudo também se pretende estudar a influência dos mesmos parâmetros de impressão acima mencionados juntamente com outro fator, a dimensão do provete, nos desvios dimensionais obtidos em relação à cota nominal nos três eixos ortogonais da impressora.

Numa primeira fase será realizada uma experiência de *screening* para reduzir o número de variáveis, uma vez que inicialmente verificava-se a existência de muitas variáveis.

Retirando das experiências as variáveis que não se mostraram significativas para as respostas em estudo será realizado um planeamento de experiências onde serão produzidos vários provetes fazendo variar os parâmetros de impressão acima descritos percentualmente em relação ao seu valor nominal. Para entender melhor a forma como estas variáveis independentes influenciam as respostas a estudar, após uma avaliação dimensional e uma avaliação da qualidade das superfícies, aplicar-se-á a Metodologia da Superfície de Resposta com fim de obter um modelo empírico que permita estimar os valores das respostas para qualquer combinação de valores dos fatores.

1.3 Estrutura do Documento

A presente dissertação está dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo encontram-se as motivações e os objetivos da presente dissertação.

O segundo capítulo descreve resumidamente o estado da arte, desde as várias tecnologias existentes e suas vantagens e desvantagens, a situação do mercado atual e uma breve explicação do processo de manufatura aditiva.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada no decorrer da dissertação e no quarto capítulo está o procedimento experimental seguido.

No quinto capítulo serão apresentados e explicados os resultados obtidos.

Por último, as conclusões e trabalho futuro estão presentes no capítulo 6.

2.1 Manufatura Aditiva

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define Manufatura Aditiva (MA) como “*the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies*” isto é: um processo de junção de materiais para criar objetos a partir de um modelo digital em 3 dimensões, geralmente camada-a-camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativa [3].

Contrariamente à maquinagem convencional, em que se parte do material em bruto e ao qual se realizam sucessivos cortes com objetivo de obter a geometria final da peça, a MA é um processo onde o objeto final é obtido partindo do vazio e adicionando material camada-a-camada [4]. Dependendo da tecnologia que usam, certas impressoras 3D são facilmente acessíveis, fáceis de operar, a sua manutenção é simples e têm uma dimensão reduzida sendo adequadas para se encontrarem num escritório [5].

É possível dizer que a principal diferença entre uma impressora de papel e uma impressora 3D é uma dimensão. Uma impressora de escritório imprime em duas dimensões, enquanto uma impressora 3D possui também liberdade de movimento na vertical (eixo z), operando assim em 3 dimensões [1].

Nos dias de hoje pode-se falar em 7 “famílias” de processos de impressão 3D, conforme se pode observar na Figura 2.1, que se distinguem em relação ao método que utilizam para criar novos produtos. Embora os processos sejam diferentes, todas partilham os seguintes 3 pontos [6]:

- Adicionam material à peça em construção, partindo de uma superfície de trabalho vazia
- Trabalham por camadas
- Usam controladores numéricos

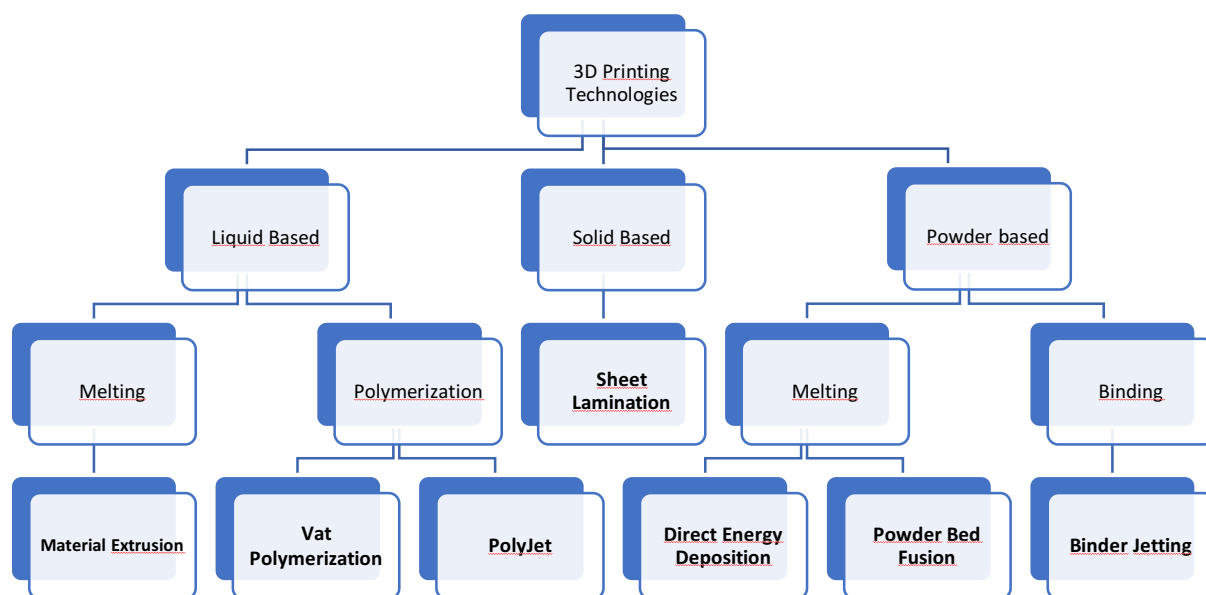


Figura 2.1 – Sete processos de manufatura aditiva. Adaptado de [6], [7]

Conforme já mencionado, atualmente existem 7 tecnologias diferentes de MA que se distinguem pelo método de produção. No subcapítulo seguinte serão introduzidas essas mesmas tecnologias e serão também apresentadas as vantagens e as desvantagens características de cada tecnologia.

2.2 Tecnologias de Manufatura Aditiva

2.2.1 *Material Extrusion*

O *Fused Deposition Modelling* (FDM), Figura 2.2, também intitulado de *Fused Filament Fabrication* (FFF), consiste na extrusão de resina termoplástica, na forma de um fio, a partir de uma cabeça de extrusão que por norma tem liberdade para se mover no plano XY. Certas impressoras FDM têm cabeças de extrusão que atuam no plano XZ, tendo uma plataforma que se move no eixo y. Este processo é bastante semelhante ao de uma máquina CNC de 3 eixos tendo como principal diferença o facto de o material ser adicionado ao contrário de ser removido [8].

Como materiais mais utilizados tem-se o PLA (Ácido Poliláctico), o ABS (Estireno Acrilonitrilo Butadieno) e PC (Policarbonato) [1].

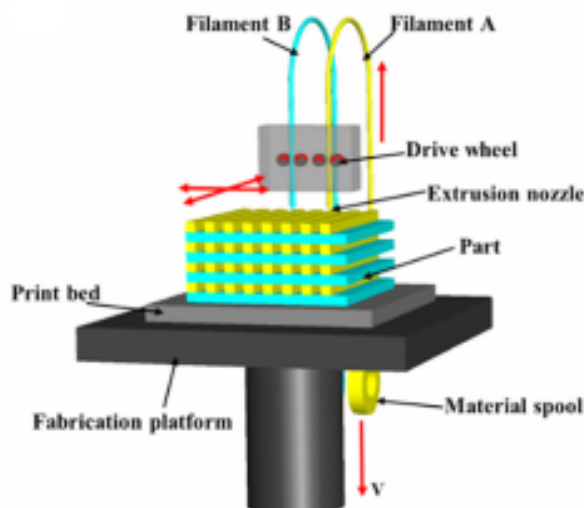


Figura 2.2 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora FDM [9]

Funcionamento:

Nesta tecnologia a cabeça de extrusão, com auxílio de um controlador numérico, derrete e deposita o material numa plataforma, que pode estar aquecida ou não, formando uma camada. Quando a camada está completa esta plataforma move-se na vertical (eixo z), descendo, e a impressora imprime a segunda camada. O processo repete-se até obtenção do produto final [1], [6].

Na Tabela 2.1 apresentam-se vantagens e desvantagens da tecnologia FDM.

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens do FDM

Vantagens	Desvantagens
+ Filamentos disponíveis em diversas cores	- Necessidade de suporte para as peças (sendo este impresso juntamente com a peça desperdiçando material)
+ Matéria-prima barata comparativamente às restantes tecnologias	- Processo lento
+ Impressoras de pequeno porte	- Material sujeito a gradientes de temperatura que podem resultar em distorções no modelo final
+ Uso de materiais que emitem fumos de baixa toxicidade	
+ Ampla gama de materiais disponível	

2.2.2 Vat Polymerization

O *Vat Polymerization* é o processo de MA a partir do qual um foto-polímero no estado líquido é curado/solidificado seletivamente através de radiação ultravioleta [3]. Existem 3 processos de foto polimerização como é o caso do SLA (*stereolithography*) e as suas variantes DLP (*Digital Light Processing*), CDLP (*Continuous Direct Light Processing*).

Conforme mencionado anteriormente, a foto polimerização é o processo pelo qual a resina líquida se transforma em sólida quando submetida a radiação ultravioleta que funciona como catalisador da reação. É possível ter pós dispersos pela resina, cerâmicos ou plásticos, que permitem obter produtos com propriedades diferentes, comparativamente aos obtidos usando exclusivamente resina [10].

Funcionamento:

Como se pode observar na Figura 2.3, no processo de SLA parte-se de uma resina que se encontra dentro de um reservatório no estado líquido. A plataforma de impressão é submersa na resina e um laser vai de encontro a um espelho que orienta o feixe mapeando a área de secção transversal solidificando a resina e criando assim uma camada. De seguida a plataforma move-se milimetricamente segundo o eixo z, para uma distância definida pela espessura de camada que se pretende, possibilitando a obtenção de camadas espessura reduzida. O processo é repetido camada a camada até se obter o objeto pretendido [11].

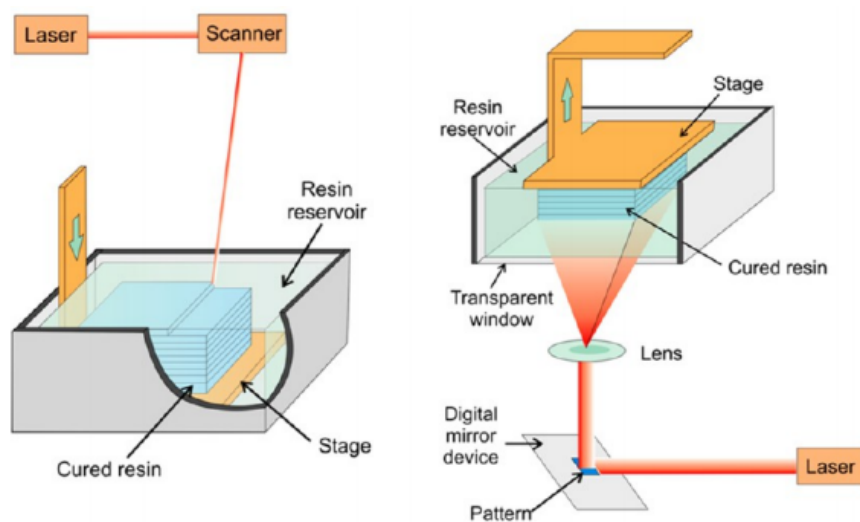


Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLA (esquerda) e de uma impressora DLP (direita) [12]

Após a impressão do objeto, este é retirado do banho de resina fotossensível e é imerso em álcool isopropílico de forma a que o excesso de resina não curada lhe seja retirada. Posteriormente, é introduzido no interior de uma câmara de radiação ultravioleta de forma a ser submetido a uma cura completa [1].

O DLP ao contrário do SLA, em vez de mapear, percorrendo com o laser o contorno da camada, projeta a imagem da área da secção transversal obtendo a camada toda ao mesmo tempo. Este processo permite resoluções que dependem do tamanho mínimo dos pixéis da imagem projetada [13].

Na Tabela 2.2 constam algumas vantagens e desvantagens da *Vat Polymerization*.

Tabela 2.2 Vantagens e desvantagens da *Vat Polymerization*

Vantagens	Desvantagens
+ Permitem camadas na ordem dos 16 micron	- Custo elevado das impressoras e das resinas
+ Bom acabamento superficial	- Tempos de fabrico elevados
+ Repetibilidade	- Resinas tóxicas
	- Álcool isopropílico é perigoso
	- Necessidade de um tratamento de cura para garantir a integridade estrutural do produto

2.2.3 Polyjet

Este processo de manufatura aditiva, Figura 2.4, desenvolvido em 2000 pela empresa israelita Object Geometries, usa um jato de resina fotossensível para criar um modelo físico [3], [14].

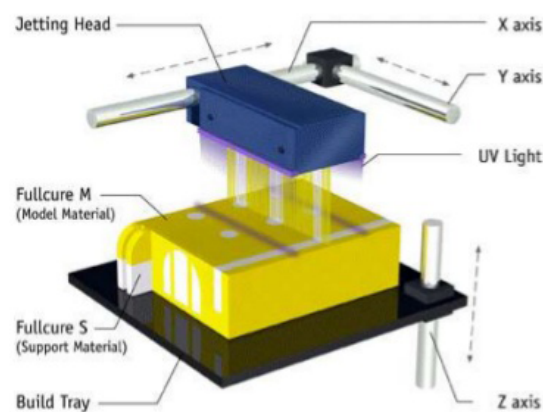


Figura 2.4 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora *Polyjet* [15]

Funcionamento

A cabeça de impressão produz a secção transversal do produto a obter, depositando gotas de um material foto-polimérico numa plataforma e ao mesmo tempo cura o material, por radiação UV, por intermédio de luzes ultravioletas que se encontram acopladas à cabeça de impressão movendo-se juntamente com ela. À medida que vão criando as camadas, a plataforma desce de forma a que se criem as camadas seguintes [1], [3], [14].

Na Tabela 2.3 constam vantagens e desvantagens do *Polyjet*.

Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do *PolyJet*

Vantagens	Desvantagens
+ Permite obter camadas bastante finas (16 micrómetros) pelo que tem elevada precisão + Permite a impressão de peças com mais que 1 material na mesma operação de impressão	- Usa foto-polímeros que para além de caros, são também relativamente frágeis, reduzindo assim o ramo de aplicações

2.2.4 Sheet Lamination

A *Laminated Object Manufacturing* (LOM), Figura 2.5, é um processo de MA em que folhas de material são ligadas e cortadas para formar um objeto. Este processo difere dos restantes uma vez que combina técnicas de fabricação aditiva e subtrativa [3], [6].

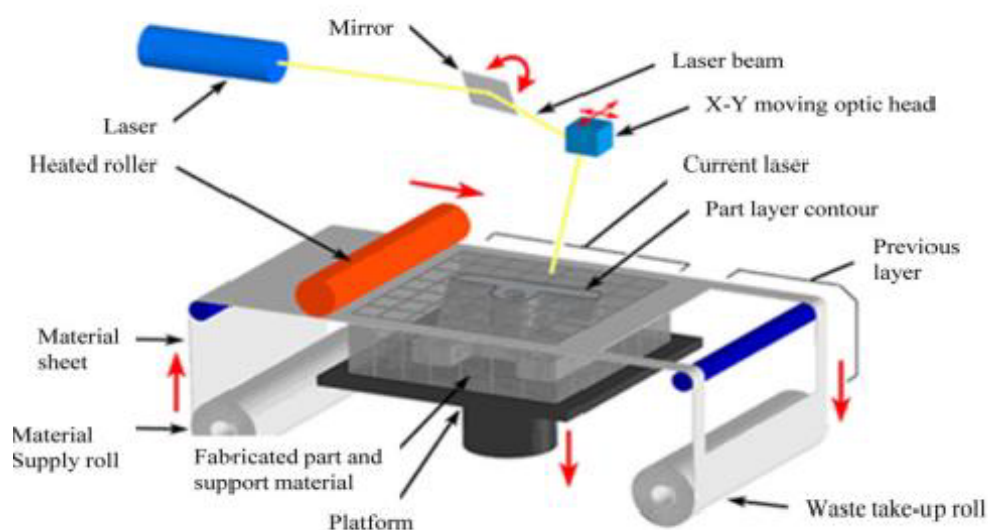


Figura 2.5 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora LOM [16]

Funcionamento:

O material chega na forma de uma folha que corresponde a uma camada. As folhas de material (papel, plástico ou metal) são cortadas por um laser de dióxido de carbono ou por uma lâmina, atribuindo assim a geometria da camada da peça a obter [6]. Quando a máquina termina o corte da primeira camada, adiciona uma nova folha de material e realiza o corte de forma a obter a seguinte camada. Outra opção é usar um rolo de material que vai fornecendo o material à medida que cada camada é recortada.

Quando se obtêm todas as camadas a impressora lamina e aplica pressão e calor por forma a que todas as camadas adiram entre si e formem um objeto 3D sólido [1], [6].

Na Tabela 2.4 estão presentes algumas vantagens e desvantagem do LOM.

Tabela 2.4 Vantagens e desvantagens da LOM

Vantagens	Desvantagens
+ Velocidade de produção relativamente rápida + Não necessita de suportes + Os materiais podem ser tão baratos quanto um papel de impressão 3D	- Desperdício de material - Peças produzidas não são adequadas para posterior maquinagem

2.2.5 Direct Energy Deposition

Neste processo de MA é usada energia térmica concentrada para ligar materiais, derretendo-os à medida que são depositados[3].

Existem 2 processos que apenas se distinguem pela energia térmica usada: o *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) que usa um feixe de eletrões para fundir o material e o *Laser Engineering Net Shape* (LENS), Figura 2.6, que usa um feixe de laser.

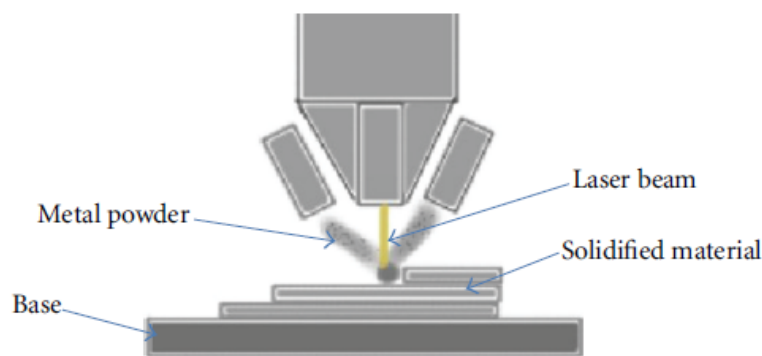


Figura 2.6 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora LENS [6]

Funcionamento:

O LENS consiste na injeção de material, sob a forma de pó, em direção a um laser de alta potência. As partículas assim que entram em contacto com o laser são imediatamente fundidas e aderem à superfície da peça que se está a imprimir. Este processo permite a impressão de objetos utilizando metais duros, tais como o titânio e o aço inoxidável, o que promoveu um aumento do interesse das indústrias automóvel e aeroespacial na área da impressão 3D[1], [8].

Na Tabela 2.5 disponibilizam-se algumas vantagens e desvantagens da tecnologia *Direct Energy Deposition*

Tabela 2.5 Vantagens e desvantagens da *Direct Energy Deposition*

Vantagens	Desvantagens
+ Permite construir formas quase densas	- Custo elevado
+ Permite obter peças com propriedades mecânicas semelhantes ou melhores que as peças obtidas pelos métodos tradicionais	- As partículas finas de material podem proporcionar um ambiente de trabalho perigoso
+ Pode ser usado para fazer o revestimento de peças maquinadas por métodos tradicionais	- Estruturas complexas necessitam de suporte

2.2.6 Powder Bed Fusion

Esta tecnologia engloba 3 processos diferentes: o *Selective Laser Sintering* (SLS), o *Selective Laser Melting* (SLM), e o *Electron Beam Melting* (EBM). Estes são todos processos de MA em que energia térmica, por intermédio de lasers de alta potência (SLS e SLM) ou por um feixe de eletrões

(EBM), fundem regiões previamente selecionadas da cama de pó (material no estado de pó) [3]. Na Figura 2.7 é possível observar uma representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLS.

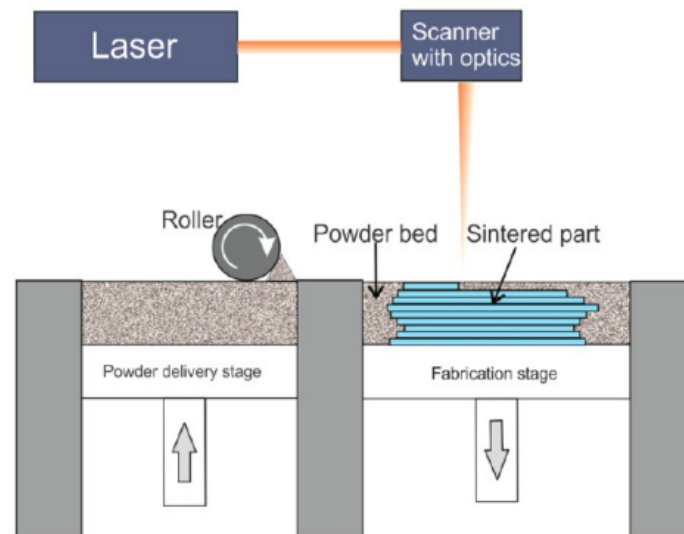


Figura 2.7 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLS [12]

Funcionamento:

O SLS consiste na deposição de uma camada de material, sendo este plástico ou metal em forma de pó, numa plataforma e posteriormente por ação de um laser os grãos são fundidos seletivamente obtendo assim a primeira camada. A plataforma desce milimetricamente, de acordo com a espessura que se pretende obter, voltando novamente a ser coberta de material em pó. Por ação do mesmo laser forma-se a segunda camada. Este processo é repetido até que se atinja a forma final do objeto. É de notar que o excesso de material sob a forma de pó que não foi fundido pelo laser pode ser parcialmente reutilizado numa futura impressão [11].

Na Tabela 2.6 constam vantagens e desvantagens da tecnologia *Powder Bed Fusion*.

Tabela 2.6 Vantagens e desvantagens da *Powder Bed Fusion*

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> + O facto de o material estar em pó torna o objeto menos provável de colapsar uma vez que o restante pó, não fundido, atua como suporte do objeto + Versátil, havendo bastantes matérias-primas disponíveis em pó 	<ul style="list-style-type: none"> - A superfície do objeto tende a ser porosa - Não é aconselhado o uso em casa ou no escritório deste tipo de impressora - Caso mal manuseados, alguns materiais têm tendência a explodir uma vez que a impressora tem uma camara selada cheia de hidrogénio

Vantagens	Desvantagens
+ Possível produzir peças de geometria bastante complexas	- O processo é bastante quente. Certas peças de maior dimensão podem levar um dia a arrefecer - Grande investimento inicial em matéria-prima

2.2.7 Binder Jetting - 3D Printing (3DP)

Este processo de manufatura aditiva, Figura 2.8, inicialmente desenvolvido no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) no início dos anos 90, começa, de forma semelhante ao *Powder Bed Fusion* com uma deposição de material em pó na plataforma de construção. No entanto, em vez de utilizar uma fonte de energia para fundir o material deposita uma pasta em cada camada, unificando o pó e formando assim a peça, camada a camada. Com esta tecnologia é possível trabalhar com polímeros, cerâmicas, areias de fundição e metais tais como o aço inoxidável e o bronze [3], [8].

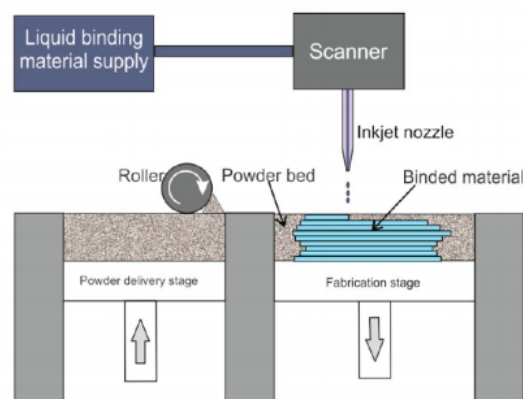


Figura 2.8 - Representação esquemática do funcionamento de uma impressora Binder Jetting [12]

Funcionamento:

Em tudo semelhante ao *Powder Bed Fusion*, contudo, utiliza um elemento de ligação líquido que ao solidificar unifica a peça ao invés de usar uma fonte de energia para fundir os materiais.

Apresentam-se na Tabela 2.7 as vantagens e desvantagens do *Binder Jetting*.

Tabela 2.7 Vantagens e desvantagens do *Binder Jetting*

Vantagens	Desvantagens
+ Permite Impressão a cores + Bastante versátil na escolha de materiais	- Não permite obter camadas finas comparativamente a outras tecnologias

2.3 Vantagens da Manufatura Aditiva

É possível constatar que cada uma das tecnologias têm as suas vantagens e desvantagens e que, comparativamente aos processos tradicionais, introduzem mais valias no ciclo produtivo. Hod Lipson e Melba Kurman (2013) estabelecem 9 Princípios de impressão 3D, alguns verdadeiros hoje em dia e outros que se tornarão possíveis nos próximos anos com o desenvolver da tecnologia [1]:

Complexidade de fabricação gratuita: nas tecnologias de fabricação tradicionais, o aumento da complexidade de um produto vai ao encontro de um aumento do seu custo de produção. No caso da impressão 3D a complexidade e a simplicidade têm o mesmo preço [1], [17].

Variedade gratuita: as impressoras 3D devido à sua grande versatilidade eliminam os custos associados à formação de operários e à substituição de ferramentas sempre que se queira produzir um produto novo.

Eliminação do processo de montagem: a impressão 3D cria peças já interligadas, reduzindo desta forma o número de componentes e o tempo da montagem, reduzindo os custos associados à mesma, quer mão-de-obra quer transporte [1], [17].

Zero lead time: a redução do tempo de aprovisionamento é possível pois as impressoras 3D permitem que o produto seja produzido no local e logo que este seja pedido, reduzindo desta forma o custo de transportes de mercadoria bem como o custo associado à retenção de stocks. É de notar que é impossível eliminar este tempo, no entanto a impressão 3D permite uma grande redução do mesmo.

Design ilimitado: a impressão 3D permite a eliminação de barreiras no que toca às formas das peças a obter, isto é, na maquinaria tradicional o formato das peças está associado às ferramentas e ao processo utilizado. Por exemplo, uma peça torneada tem de ser uma peça de revolução [1],[18].

Manufatura sem habilitações: os artesãos tradicionais treinam durante anos até adquirirem as habilidades para produzir uma peça sem defeitos. As impressoras 3D apenas requerem um especialista qualificado para que a ajuste e calibre sendo o restante processo automático, proveniente da leitura do ficheiro que contém o modelo desenhado.

Manufatura compacta e portátil: comparativamente aos processos tradicionais, as impressoras 3D conseguem produzir objetos tão grandes quanto a sua cama de impressão. Devido ao seu tamanho as impressoras 3D podem-se transportar facilmente de um lado para o outro, permitindo que os objetos sejam impressos no local exato onde são precisos.

Menos desperdício por produto: uma vez que a impressão 3D produz os objetos na sua forma final, utilizando apenas o material necessário, elimina desta forma todas as operações de desbaste associadas aos processos tradicionais de produção, criando menos desperdício de material.

Multimaterial: à medida que a impressão 3D multimaterial se desenvolve ganhar-se-á a capacidade de misturar diferentes tipos de matéria-prima.

Olhando agora para uma perspetiva de projeto de novos produtos, a MA também traz grandes vantagens. Certos estudos mostram que cerca de 70 a 90% do custo de um produto é estabelecido antes da fase de produção, Figura 2.9. A Manufatura Aditiva permite diminuir o tempo de desenvolvimento de um produto através de uma das suas principais aplicações, a prototipagem rápida. Com um protótipo é possível realizar testes, estudar o melhor design aplicável ao produto com um custo relativamente pequeno uma vez que a MA não necessita de molde nem ferramentas especiais [19].

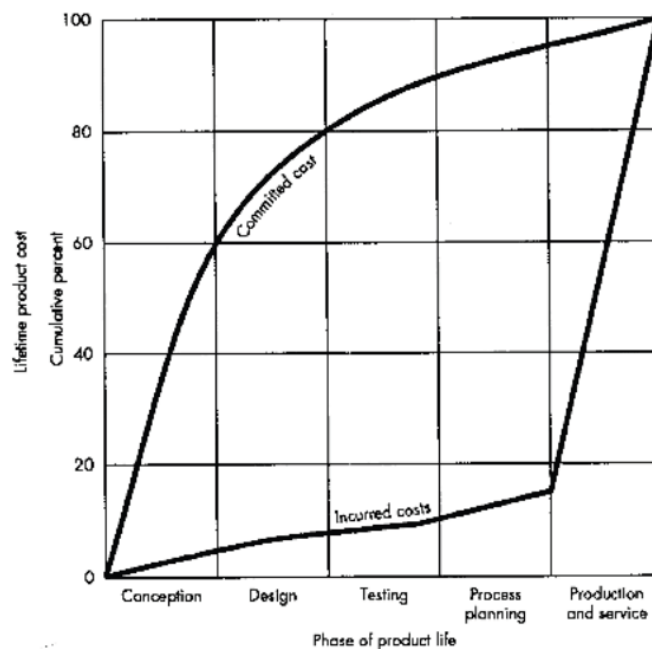


Figura 2.9 – Custos incorridos versus custos comprometidos [20].

Observando agora para a Figura 2.10, é possível concluir que durante uma fase inicial do projeto, tem-se pouca informação sobre o produto, é fácil proceder a alterações e o custo das alterações é baixo. Através da prototipagem rápida, uma das principais aplicações da MA, é possível obter mais

informação sobre o produto numa fase inicial, corrigindo qualquer erro que surja de forma antecipada, sendo então possível concluir que a MA tem um papel importante na conceção e projeto de novos produtos [19].

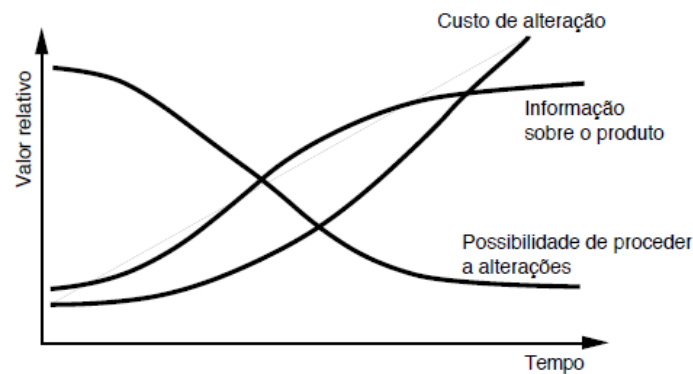


Figura 2.10 - Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto [21].

2.4 Desvantagens da Manufatura Aditiva

A MA apresenta também algumas desvantagens e limitações. Para além de estar limitada à produção de produtos de pequena e média dimensão podem-se ainda mencionar as seguintes desvantagens [6], [8], [22]:

Volumes de produção baixos: Principalmente devidos ao tempo de produção, este tipo de manufatura não suporta produções em massa. Efeitos de escala são negligenciáveis.

Propriedades mecânicas: Uma vez que operam camada a camada, existem múltiplas interfaces de ligação de material podendo causar defeitos no produto. Comportamento ortotrópico com baixas propriedades mecânicas na direção normal ao plano de impressão.

Necessidade de operações de pós-processamento: O acabamento superficial e a precisão dimensional, dependendo da tecnologia utilizada, podem levar a uma qualidade inferior comparativamente a outros processos de produção.

Gama de materiais limitada: Comparativamente às restantes manufaturas, a gama de materiais é inferior, estando muito associada a polímeros, pequena gama de cerâmicos e alguns metais e ligas.

2.5 Breve História da Manufatura Aditiva

O Fabrico Aditivo surge nos anos 80, embora já houvessem relatos de experiências na área nos anos 70, sendo nesta década que nascem as 3 principais técnicas de impressão 3D (SLA, SLS e FDM) [23].

Em 1986 surge a primeira patente em SLA, também intitulada de *StereoLithography* (SL), processo que consiste na solidificação de camadas finas de uma resina fotossensível por meio de radiação ultravioleta. Esta patente pertence a Charles Hull que é cofundador da empresa 3D Systems. Em 1987 é posto à venda o primeiro sistema de impressão 3D, a impressora SLA-1, pela 3D Systems. Tal permitiu aos utilizadores, pela primeira vez, criar um objeto físico a partir de dados digitais.

Em 1988, na University of Texas-Austin, Carl Deckard emite uma patente para uma revolucionária tecnologia de impressão 3D, a SLS (*Selective Laser Sintering*), tendo como base a fundição seletiva de grãos por intermédio de um laser de alta potência, obtendo excelentes resultados. Também neste ano, Scott Crump publica uma patente para a tecnologia FDM que consiste na extrusão de resina termoplástica conforme previamente mencionado[24].

Com o início da nova década, na Europa, é fundada e criada a EOS (*Electro Optical Systems*) com objetivo de iniciar o ramo da prototipagem industrial. Nos dias de hoje a EOS é líder em tecnologia e a sua qualidade é reconhecida mundialmente. É também nos anos 90 que surgem as primeiras aplicações de impressão 3D no ramo da medicina e se desenvolvem as ferramentas CAD.

Com o início do milénio surge o primeiro rim operacional produzido numa impressora 3D. No entanto, foi necessário esperar 13 anos até se observar um transplante.

O ano 2009 fica marcado como o ano em que as patentes FDM expiraram e caíram em domínio público dando origem a uma queda abrupta do custo das impressoras e a uma maior acessibilidade [25].

Na atual década, a impressão 3D começa a ser aplicada em vários sectores e surgem novas ideias desde o Urbee em 2010, o primeiro protótipo de um carro impresso ou até mesmo a primeira casa habitável impressa pela empresa Apis Cor em 2016.

2.6 Mercado

De acordo com o Wohlers Report (2018), em 2017 a indústria da MA, composta por todos os produtos e serviços, cresceu 21% para 7.336 biliões de dólares americanos. O crescimento em 2017 compara-se a um crescimento de 17,4% em 2016 quando a indústria atingiu os 6.063 biliões de dólares e 25.9% em 2015. A estimativa total do valor da indústria exclui os investimentos internos da Airbus, Adidas, Ford Toyota, Stryker e centenas de outras empresas, pequenas, médias e grandes [26].

2.7 Aplicações

A empresa Sculpteo lançou em Maio de 2018 um estudo sobre o estado atual da impressão 3D realizando entrevistas a 1000 empresas e *start-ups* distribuídas globalmente (60% na Europa, 25% na América, 9% na Ásia e Oceânia e 1% em África). Estas empresas encontram-se em indústrias variadas tais como Aeronáutica, Aeroespacial, Automóvel, Eletrónica, *High Tech*, Saúde, entre outras. Os seguintes gráficos representam informação considerada relevante e retirada desse mesmo estudo.

Na Figura 2.11 encontram-se as aplicações da MA usadas pelas empresas que participaram no estudo.

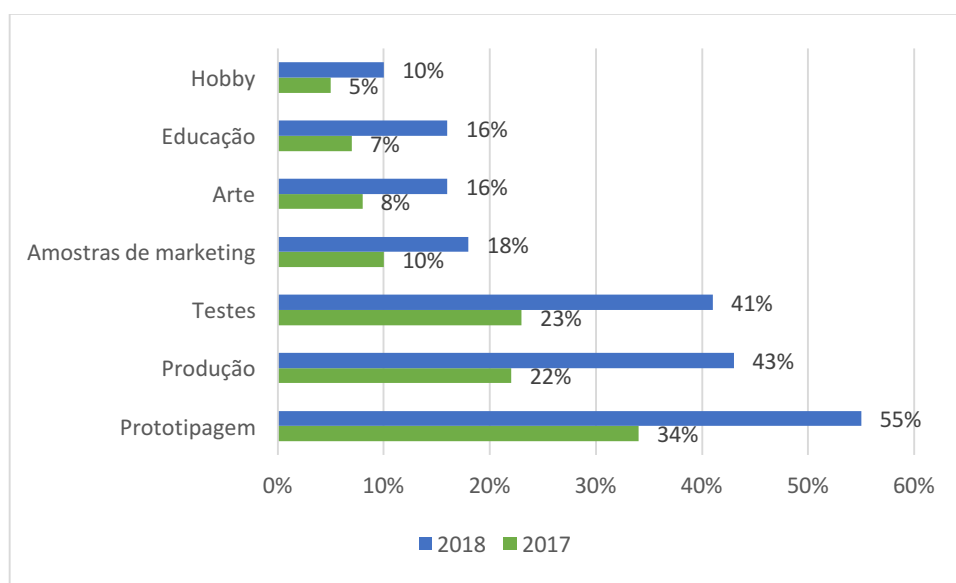


Figura 2.11 - Aplicações da MA por parte das empresas (Estudo Sculpteo)

A prototipagem, produção e realização de testes aos modelos eram as principais aplicações da MA até ao final de 2017. No primeiro trimestre de 2018 foram essas mesmas que tiveram os maiores aumentos percentuais sendo desta forma um bom indicador para de que as empresas investem fortemente nestas três aplicações da MA.

Foi também pedido às empresas para apontarem os principais benefícios que a MA trouxe para as suas empresas. Na Figura 2.12, estão presentes os resultados provenientes dos questionários realizados às empresas.

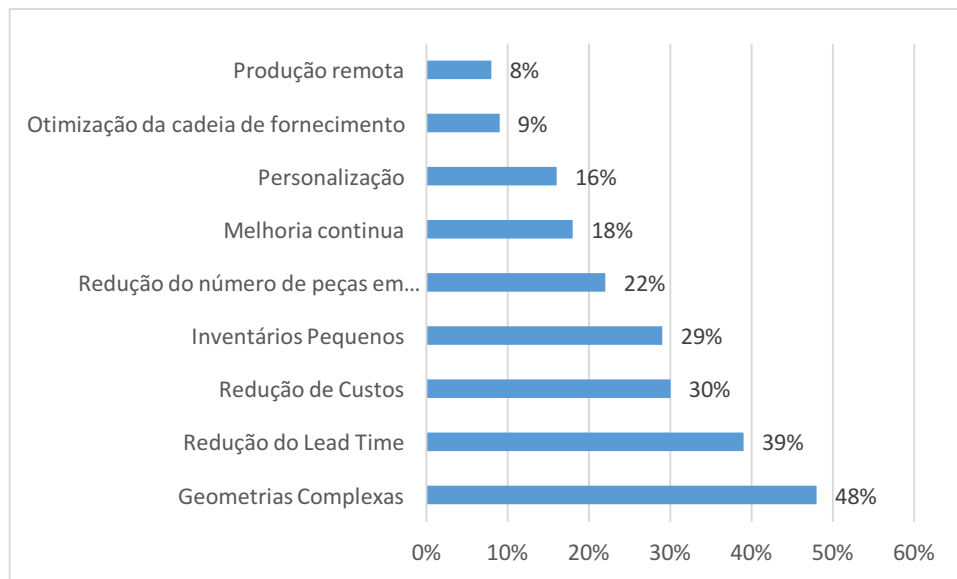


Figura 2.12 - Benefícios apontados pelas empresas desde que começaram a utilizar a MA (Estudo Sculpteo).

Constata-se que o principal benefício é a produção de peças com geométricas complexas seguido da redução do tempo de aprovisionamento (*Lead Time*).

2.8 Fases do Processo de Manufatura Aditiva

Todos os sistemas de fabrico partilham uma série de etapas que vão desde a modelação num programa CAD até ao produto final conforme se pode observar na Figura 2.13.

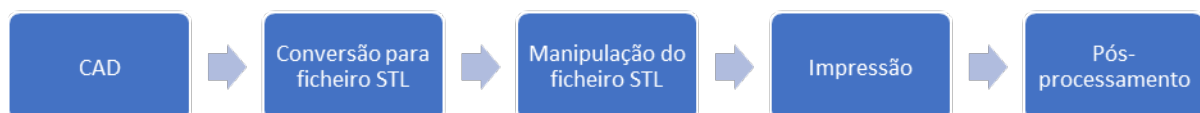


Figura 2.13 - Diagrama de etapas do processo de manufatura aditiva.

1ª Etapa: Modelação do objeto em 3D (CAD)

O primeiro passo passa sempre pela criação de um modelo tridimensional com apoio de *softwares* CAD como o SolidWorks, CATIA, Pro-Engineer, entre outros. Outra opção passa por realizar um *scan* 3D de um objeto que se queira replicar sendo que, caso se opte pelo *scanner*, é necessário posterior manipulação da nuvem de pontos obtida pelo mesmo de forma a obter o modelo digital.[6], [7]

2ª Etapa: Conversão para o formato STL

O ficheiro STL foi criado em 1987 pela empresa 3D Systems na mesma altura em que desenvolveram a tecnologia de estereolitografia. Por este motivo o acrónimo STL advém dessa mesma tecnologia [6]. Outros autores consideram o acrónimo STL como *Standard Triangle Language*.

Um ficheiro STL pode ser definido como um arquivo que descreve o layout de um objeto tridimensional, gerando uma malha de triângulos vinculados de forma a recriar a geometria da superfície de um modelo sólido. Cada triângulo é definido por três vértices, cada um com coordenadas x, y e z, e por um vetor perpendicular ao plano do mesmo [27], [22]. Quanto mais pequenos são os triângulos maior é a proximidade do ficheiro STL ao modelo em CAD [6].

3ª Etapa: Manipulação do ficheiro STL

Completa a conversão, o ficheiro STL é cortado em fatias que correspondem, cada uma, a camadas do objeto a ser impresso. Este corte em fatias introduz uma imprecisão no modelo uma vez que durante a conversão o algoritmo transforma uma linha (contorno) contínua em degraus [27]. Tal efeito é observado na Figura 2.14. Este efeito será estudado nesta dissertação com o objetivo de perceber como é que este influencia a rugosidade na superfície das peças.

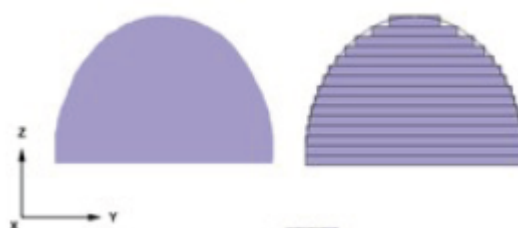


Figura 2.14 - Defeito de "degraus" ou "escada"[23]

Com auxílio de um *software* de manipulação, o ficheiro STL é preparado para impressão, ajustando o tamanho, posição e orientação do modelo. A orientação da peça a imprimir afeta o tempo necessário para a impressão da mesma, pelo que orientar a peça de forma a que a sua dimensão na direção vertical da peça seja menor, diminui o número de camadas, e consequentemente, reduz o tempo de impressão.

Um bom exemplo da importância da orientação no que toca à precisão da peça impressa é a impressão de dois cilindros com um furo passante, um com o eixo na vertical e outro com o eixo na horizontal. O cilindro com eixo vertical será construído usando uma série de círculos concêntricos enquanto o cilindro de eixo horizontal é construído com uma série de retângulos, variando a sua largura.

Sendo a plataforma de impressão plana, no caso do segundo cilindro, afetará a sua geometria uma vez que as primeiras camadas impressas se tornarão planas também, como é visível na Figura 2.15 [7].

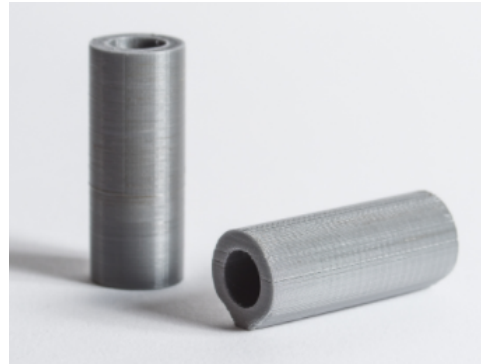


Figura 2.15 - Exemplo de defeitos originados devido ao mau posicionamento da peça [7]

Outro fator de elevada importância é a resistência da peça, como se pode observar na Figura 2.16. Principalmente em impressoras FDM, as peças obtidas apresentam propriedades anisotrópicas. Isto é, estas peças aguentam tensões mais elevadas, sem fraturar, quando as tensões uniaxiais são aplicadas na direção dos eixos x e y. Quando as tensões são aplicadas na direção do eixo z, a peça é muito mais frágil uma vez que as camadas tendem a “descolar”[7].

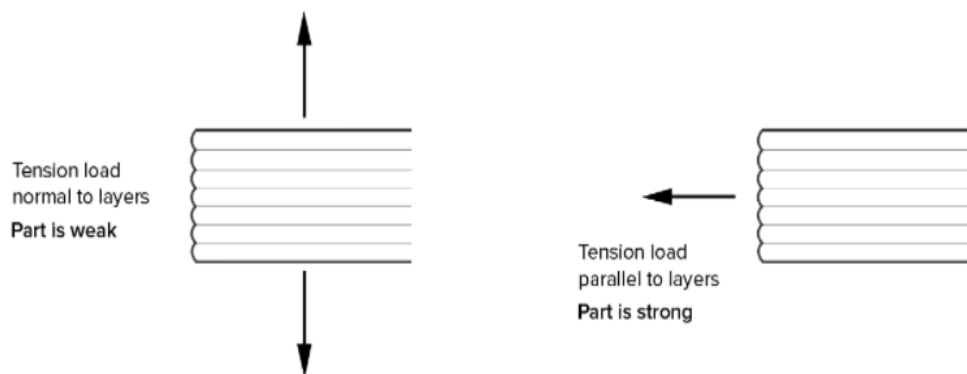


Figura 2.16 - Anisotropia característica de peças impressas em impressoras FDM [7]

Em alguns processos de impressão, como por exemplo é o caso do SLA, é necessário que a peça tenha alguns apoios, sendo nesta etapa que se estabelecem os mesmos.

4ª Etapa: Impressão do modelo

Após utilizar qualquer um dos processos previamente explicados no subcapítulo 2.1 imprime-se o modelo, camada a camada. Este processo é totalmente automático e pode demorar várias horas

consoante o número de peças a imprimir e a dimensão das mesmas. O processo dá-se por completo quando a impressora terminar a impressão [22].

5ª Etapa: Pós-processamento

Após impressão do modelo é necessário, no caso das resinas poliméricas, uma cura numa camara ultravioleta bem como a remoção dos apoios impressos para suportar a peça durante a etapa de impressão [7], [22].

Aqui, também podem ser realizadas limpezas e acabamentos superficiais de forma a obter uma melhor superfície.

3.1 Introdução

Uma experiência é definida como uma série de testes em que várias alterações são realizadas a variáveis independentes de um processo/sistemas, Figura 3.1, com intuito de observar e identificar as razões para as mudanças que possam ocorrer nas variáveis dependentes [29].

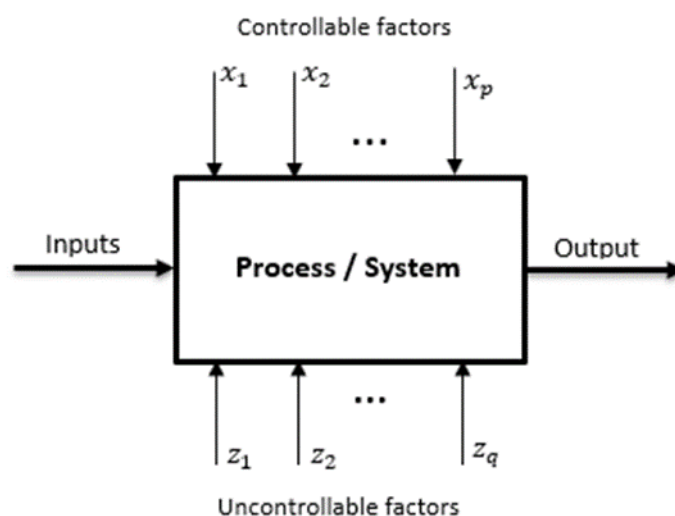


Figura 3.1 - Exemplo de um sistema/processo [29]

Atualmente, a indústria não dispõe de tempo nem financiamento para realizar experiências por tentativa-erro alterando um fator de cada vez (*OFAT- One Factor At a Time*). Para além de dispendioso este método falha em não considerar possíveis interações entre fatores. Estas interações são bastante comuns e por tal motivo o método OFAT produz resultados fracos [28].

Posto isto, nesta dissertação, propõe-se o uso de um *Design of Experiments* (DoE) que possibilita a alteração em simultâneo de múltiplos fatores e através de ferramentas de estatística, permitindo obter uma resposta para qualquer combinação de valores.

3.2 *Design Of Experiments* (DoE)

O DoE é um procedimento eficiente para analisar os resultados obtidos de uma experiência permitindo obter conclusões válidas. Este procedimento identifica os *inputs*/variáveis mais significativas/influentes do sistema usando modelos matemáticos de forma a prever a resposta do sistema para qualquer combinação de valores.

Conforme dito anteriormente, este procedimento permite variar vários *inputs* ao mesmo tempo com o objetivo de medir e analisar os seus efeitos num determinado número de variáveis dependentes (respostas). Desta forma, o DoE permite obter uma grande quantidade de informação a partir de um número reduzido de experiências [29].

Montgomery Douglas (2004) recomenda que se siga o seguinte procedimento [29]:

1. Reconhecimento e estabelecimento do problema
2. Escolha dos fatores, níveis e alcance
3. Seleção das variáveis de resposta
4. Escolha do design da experiência
5. Realização da experiência
6. Análise estatística dos dados
7. Conclusões e recomendações

Os pontos 2 e 3 podem ser realizados em simultâneo ou em ordem inversa.

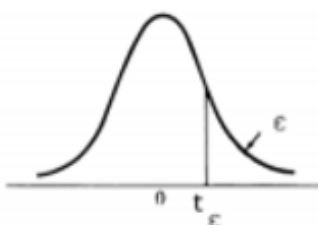
O nível de significância de cada variável na resposta é avaliado estatisticamente através dos resultados das diversas iterações e tem sempre em conta os efeitos cruzados entre fatores.

Quando o número de variáveis a estudar é elevado aconselha-se à realização de uma experiência de *screening*, realizando logo de início uma triagem às variáveis que não são significativas para as respostas.

3.3 Identificação das variáveis significativas

Para identificar os variáveis significativas é usado o teste “t”. O valor de t para cada termo é determinado pelo quociente entre o coeficiente de correlação e o erro associado sendo posteriormente comparado com o valor tabelado da distribuição “t-Student” (Tabela 3.1). Se o valor calculado exceder o valor tabelado, a variável é considerada significativa. O resultado da análise dos dados experimentais é por norma indicado numa tabela de análise de variância (ANOVA).

Tabela 3.1 - Distribuição t-Student ($\alpha=0,05$)



n	$\epsilon=0.4$	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.31
2	.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.326
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.213
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

3.4 Análise de Variância (ANOVA)

A tabela ANOVA tem o seu nome proveniente do anglo-saxónico, *ANalysis Of VAriance* e apresenta a configuração apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela de análise de variância (ANOVA)[30]

Fonte de Variação	SS	gdl	MS	F
Regressão	SSR	p-1	MSR = SSR/(p-1)	[SSR/(p-1)]/[SSE/(N-p)]
Resíduos	SSE	N-p	MSE = SSE/(N-p)	
Total	SST	N-1		

Os termos presentes na tabela são:

- *Total Sum of Squares (SST)*, é a variação total, também designada por Soma Total dos Desvios Quadráticos.

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad (3.1)$$

- *Sum of Squares due to the Regression (SSR)*, é a soma dos desvios quadráticos derivados da regressão.

$$SSR = \sum_{u=1}^N (\widehat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad (3.2)$$

- *Sum of Squares of the Residual (SSE)*, é a Variação Residual ou Erro.

$$SSE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad (3.3)$$

Onde Y_u é a resposta observada em cada experiência, \bar{Y} é a média das respostas observadas e \widehat{Y}_u é o valor previsto pelo modelo adaptado.

O quociente entre as duas variações (SSR e SSE) e o respetivo número de graus de liberdade são as variâncias (MSR e MSE), designadas por Desvios Quadráticos Médios ou em literatura anglo-saxónica **MS - Mean Square**:

$$MSR = \frac{SSR}{p - 1} \quad (3.4)$$

$$MSE = \frac{SSE}{N - p} \quad (3.5)$$

E por fim o valor de F que é usado para testar a significância do modelo matemático proveniente da regressão:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (3.6)$$

Para testar a significância do modelo matemático resultante da regressão foi utilizado o teste da hipótese nula H_0 , considerando todos os β 's iguais a zero, com exceção de β_0 . Este teste, assumindo a normalidade da distribuição dos erros utiliza a função F cujo o valor é determinado pela razão expressa na equação 3.6. Confirmada a hipótese nula, a razão F segue uma distribuição de Fisher, com (p-1) e (N-p) graus de liberdade.

Calcula-se então o valor de F utilizando a equação 3.6 e compara-se esse valor com o valor tabelado de $F_{(p-1, N-p, \alpha)}$, na distribuição de Fisher (Tabela 3.3) sendo α o nível de significância adotado (Nesta dissertação foi considerado um valor de $\alpha = 0,05$ que equivale a um intervalo de confiança de $(1-\alpha = 0,95 = 95\%)$). Se o valor de F obtido pela equação for superior ao valor tabelado a hipótese nula é rejeitada no nível α de significância, concluindo-se desta forma que nem todos os coeficientes à exceção de β_0 são nulos e que a variação inerente ao modelo é significativamente maior que a parte da variação não considerada. Desta forma o modelo de regressão é aceite [30].

Na tabela ANOVA é comum também apresentarem-se os valores de R^2 e R_a^2 . O R^2 é chamado de coeficiente de correlação e é calculado através da expressão:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (3.7)$$

Este coeficiente pode ser interpretado como a variação total dos valores experimentais relativamente à média obtida pela equação de regressão ou como a proporção dos valores previstos pelo modelo que expressão as respostas do processo. Um modelo é considerado como sendo um modelo ideal quando $R^2 = 1$ pois representa de forma exata a resposta de um processo/sistema [30].

O R_a^2 é chamado de coeficiente de correlação ajustado. Este representa a diminuição do erro da equação de regressão quando apenas comparado com a média das respostas. Este coeficiente pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(N - 1)}{(N - p)} \quad (3.8)$$

Tabela 3.3 - Distribuição F de Fisher. ($\alpha = 0.05$)

m \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	243.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

3.5 Metodologia da Superfície de Resposta (RSM)

A Metodologia de Superfícies de Resposta é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que se baseiam no ajuste de uma equação polinomial aos dados experimentais. Esta equação deve descrever o comportamento de um conjunto de dados com o objetivo de fazer previsões estatísticas [31].

O domínio experimental é estabelecido pelos limites máximo e mínimo das variáveis em estudo querendo isto dizer que a superfície só obtém resultados fidedignos no intervalo estabelecido pelos limites máximo e mínimo [30].

Etapas da aplicação da RSM [31]:

1. Seleção das variáveis independentes que têm mais influência no sistema através de estudos de triagem e delimitação do domínio experimental tendo em conta o objetivo do estudo;
2. Realização da experiência de acordo com a matriz experimental selecionada;
3. Tratamento matemático-estatístico dos dados experimentais obtidos através do ajuste de uma função polinomial;
4. Avaliação da aptidão do modelo;
5. Verificação da necessidade e da possibilidade de realizar um deslocamento em direção à região ótima;
6. Obtenção dos valores ótimos para cada variável estudada.

3.6 *Central Composite Design*

O *Central Composite Design* (CCD) é o mais popular para estimar coeficientes no modelo polinomial de segundo grau e consiste numa matriz formada por 3 grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado; um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais conforme se pode observar na Figura 3.2 [32][30].

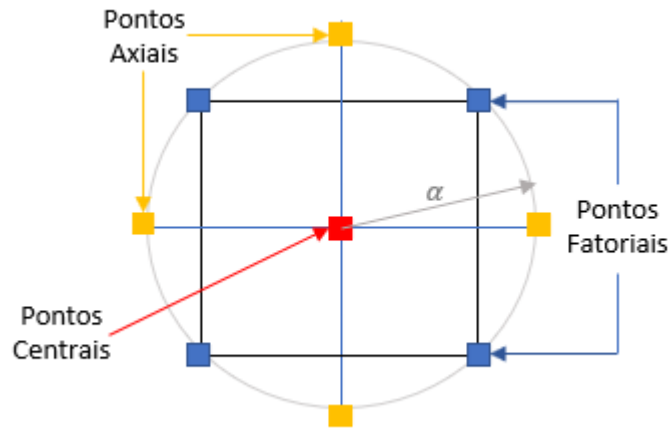


Figura 3.2 Pontos de um *Central Composite Design*. Adaptado de [32]

O número total de pontos distintos do design igual a $n = 2^k + 2k + n_0$ para um fatorial completo [33], em que k representa o nº de variáveis.

Estes três tipos de pontos distintos têm funções diferentes:

- Os pontos fatoriais (2^k) contribuem para estimar os termos lineares e são os únicos que contribuem para estimar os termos da interação entre dois fatores;
- Os pontos axiais ($2k$) contribuem para estimar os termos quadráticos;
- Os pontos centrais (n_0) fornecem uma estimativa do interno do erro, mas também contribuem na estimativa dos termos quadráticos.

Na Figura 3.3 é possível observar um CCD com $k = 2$ variáveis e na Figura 3.4 um CCD com $k = 3$ variáveis.

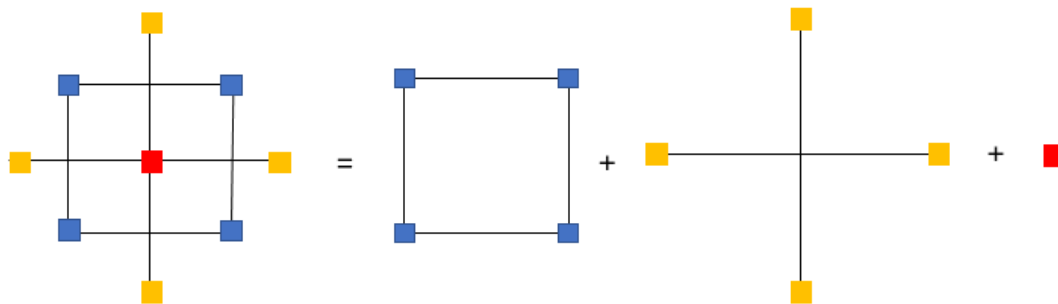


Figura 3.3 CCD para $k = 2$ variáveis. Adaptado de [33]

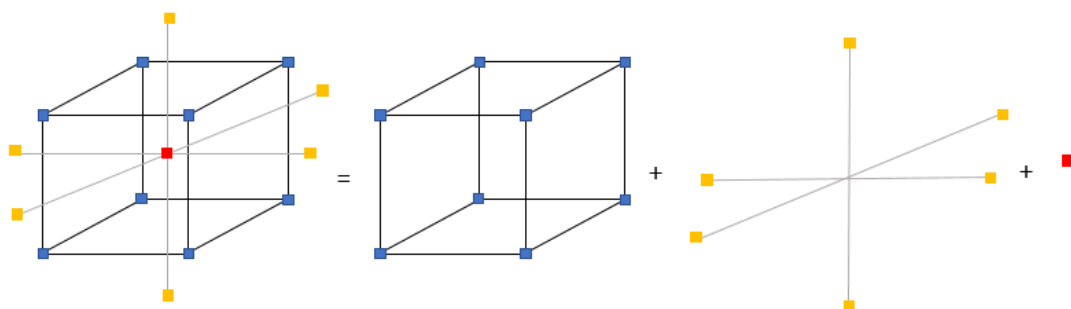


Figura 3.4 CCD para $k = 3$ variáveis. Adaptado de [33]

Existem 3 tipos diferentes de CCD: o circunscrito (CCC), o de face centrada (CCF) e o inscrito (CCI), conforme se pode observar na Tabela 3.4 [34]:

Tabela 3.4 Tipos de CCD

Representação	Tipo de CCD	Terminologia	Observações
	Circunscrito	CCC	O design circunscrito é a forma original do CCD. Os pontos axiais estão a uma distância α do ponto central e são estes pontos que estabelecem os extremos máximo e mínimo dos fatores. Este design requer 5 níveis para cada fator.
	Face Centrada	CCF	O design de Face Centrada tem os pontos axiais no centro de cada face, como tal $\alpha = \pm 1$. Este design requer 3 níveis para cada fator.
	Inscrito	CCI	O design inscrito usa os pontos axiais como nível +1 e -1 criando um design fatorial ou um design fatorial fracionário. Este design tal como o CCC também requer 5 níveis para cada fator.

É de notar que dos três tipos de CCD apresentados na tabela anterior, o CCC é o que explora um maior domínio e o CCI explora o menor. Tanto o CCC como o CCI são rotacionais, já o CCF não o é pois, tal como é visível na figura presente na Tabela 3.4, este design tem 4 pontos fora do círculo (excluindo o ponto zero)[34].

Tal como expresso em cima, o CCC é o tipo de design que explora um maior domínio do espaço. Como tal, será esse mesmo que será utilizado no decorrer da experiência realizada nesta dissertação. Este design requer 5 níveis a cada fator que serão $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$.

O valor α foi escolhido por Box e Hunter para manter o design rotacional e o seu valor depende do número de pontos fatoriais sendo definido pela Equação 3.7 [34].

$$\alpha = (n_f)^{\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

Em que $n_f = 2^k$

Num design rotacional, a variância da resposta prevista, $Y(x)$, é constante em todos os pontos que estão equidistantes do centro do design. Para que o CCD seja rotacional, o número de pontos centrais pode ser qualquer valor integral maior que zero (sendo aconselhado usar no mínimo 5 pontos centrais [30]), mas o valor de α tem de respeitar a Equação 3.7 [34].

Na Tabela 3.5 encontram-se os valores de α para que o CCD seja rotacional bem como o número de pontos do design (excluindo o(s) pontos centrais).

Tabela 3.5 Valores de α para que o CCD seja rotacional. Adaptado de [34]						
k =	2	3	4	5	6	7
$n_f + 2k$	8	14	24	42	76	142
α	1.414	1.682	2	2.378	2.828	3.364

Modelo de Segunda Ordem

O modelo de segunda ordem é bastante flexível e oferece uma boa aproximação à “verdadeira” superfície de resposta sendo por isso bastante utilizado na metodologia da superfície de resposta.

Usando o *Central Composite Design*, o polinômio de segundo grau que representa a função resposta é [33]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.10)$$

Onde β_i são os coeficientes de regressão para os termos de primeiro grau, β_{ii} são coeficientes para os termos quadráticos puros, β_{ij} são os coeficientes para os termos de interação entre variáveis e ε é o termo de erro aleatório.

O número de termos na equação 3.8 é dado por p, sendo igual a:

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3.11)$$

A estimativa dos valores b_0 , b_i , b_{ii} e b_{ij} dos respectivos coeficientes β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} no modelo são calculados usando [33]:

$$b_0 = \frac{2\alpha^2(\alpha^2 - k)}{D} \sum_{u=1}^M Y_u + \frac{M(k - \alpha^2)}{D} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u + \frac{(2\alpha^4 + Mk)}{D} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u \quad (3.12)$$

$$b_i = \frac{1}{(M + 2\alpha^2)} \sum_{u=1}^M x_{ui} Y_u + \frac{\alpha}{(M + 2\alpha^2)} (Y_{M+2i} - Y_{M+2i-1}) \quad 1 \leq i \leq k \quad (3.13)$$

$$b_{ii} = \frac{-(M + 2\alpha^2)}{D} \sum_{u=1}^N Y_u + \frac{1}{2\alpha^4} \left[\sum_{u=1}^M Y_u + \alpha^2 (Y_{M+2i} - Y_{M+2i-1}) \right] + \frac{(M + 2\alpha^2)^2}{2\alpha^4 D} \left[k \sum_{u=1}^M Y_u + \alpha^2 \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u \right] \quad (3.14)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{u=1}^M x_{ui} x_{uj} Y_u \quad 1 \leq i < j \leq k \quad (3.15)$$

Onde N é o número total de experiências, $M = 2^k$, $D = (2\alpha^4 + Mk)N - (M + 2\alpha^2)^2 k$, e caso o design seja rotacional $\alpha = \sqrt[4]{M}$.

Posto isto, as fórmulas anteriores podem ser simplificadas para [33]:

$$b_0 = \frac{2\left(1 - \frac{k}{\sqrt{M}}\right)}{D^*} \sum_{u=1}^M Y_u + \frac{M(k - \sqrt{M})}{D^*} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u + \frac{(k+2)}{D^*} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u \quad (3.16)$$

$$b_i = \frac{1}{H^*} \sum_{u=1}^M x_{ui} Y_u + \frac{\sqrt[4]{M}}{H^*} (Y_{M+2i} - Y_{M+2i-1}) \quad 1 \leq i \leq k \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} b_{ii} = & \frac{(N - M - 2\sqrt{M})}{MD^*} \sum_{u=1}^N Y_u \\ & + \frac{(M + 2\sqrt{M} - N)}{2\sqrt{M}D^*} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u \\ & - \frac{1 + \frac{2}{\sqrt{M}}}{D^*} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u + \frac{1}{2\sqrt{M}} (Y_{M+2i} + Y_{M+2i-1}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{u=1}^M x_{ui} x_{uj} Y_u \quad 1 \leq i < j \leq k \quad (3.19)$$

Onde N é o número total de experiências,

$$D^* = N(k+2) - (2 + \sqrt{M})^2 k$$

$$H^* = M + 2\sqrt{M}$$

$$M = 2^k$$

Procedimento Experimental

4.1 Materiais

Nas impressoras FDM é possível trabalhar com diversos materiais como por exemplo ABS, PLA, Nylon, PETG, TPU e PEI. Na Figura 4.1, pode-se observar uma pirâmide com todos os materiais possíveis de utilizar. Na base da pirâmide encontram-se os materiais com piores propriedades mecânicas e no topo os que têm melhores propriedades.

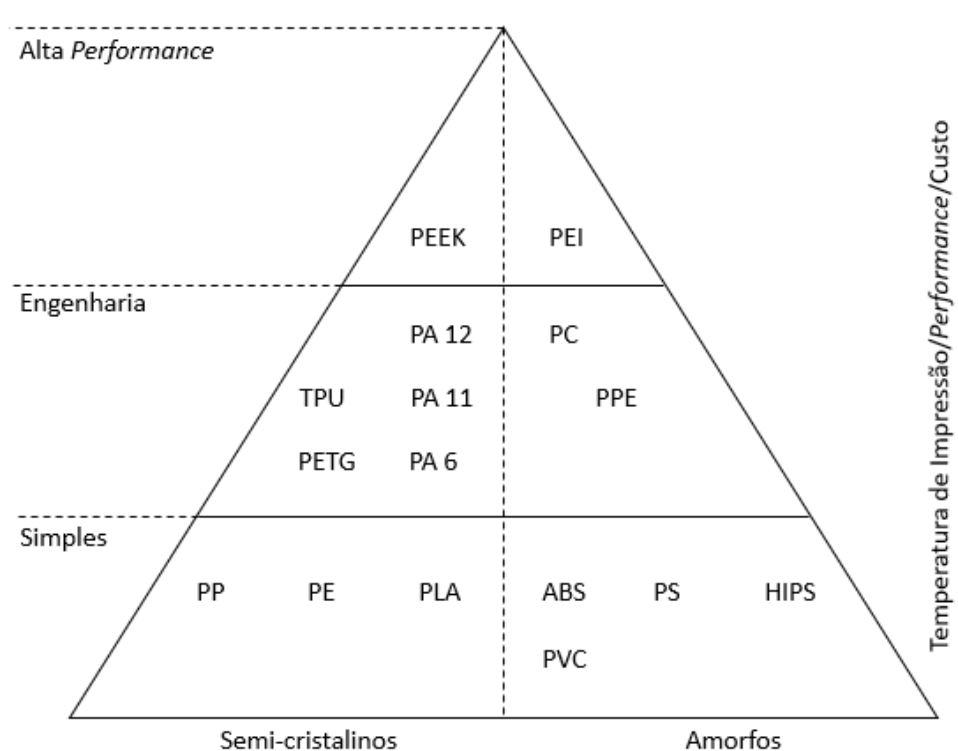


Figura 4.1 - Gama de materiais disponíveis para impressoras FDM. Adaptado de [35].

Para as impressoras em estudo foi utilizado como matéria-prima o PLA que é um termoplástico com origem no amido extraído do milho, sendo por isso biodegradável. O filamento de PLA é da marca Filkemp e tem as características presentes na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Características do PLA utilizado na impressão dos provetes

Módulo de elasticidade	2346,5 MPa
Densidade	1,24 g/cm ³
Temperatura de fusão	145/160 °C
Diâmetro do filamento	1,75 mm

4.2 Equipamento utilizado na impressão dos provetes

Conforme já mencionado, trabalhou-se com 2 impressoras, a Blocks Zero e a Blocks One. Ambas usam a tecnologia FDM. Apresentam-se em seguida as especificações de cada uma das impressoras.

4.2.1 Blocks Zero

Na Figura 4.2, pode-se observar a impressora Blocks Zero. Na Tabela 4.2 é possível observar algumas características da Blocks Zero.

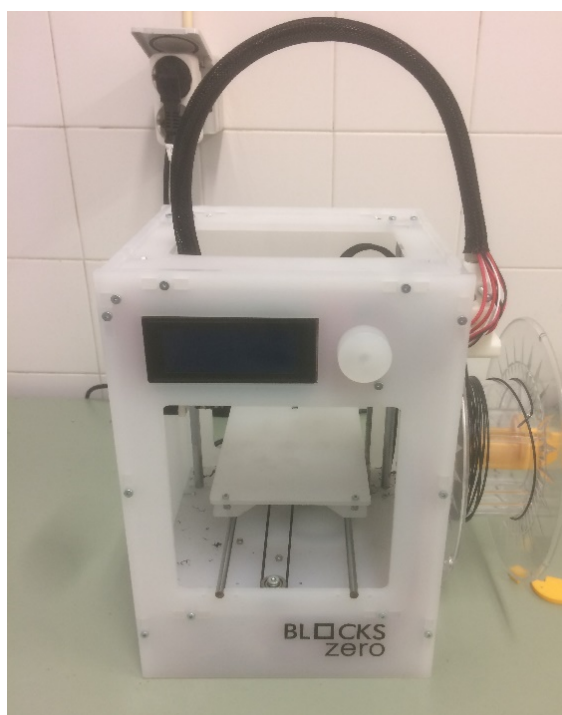


Figura 4.2 - Impressora Blocks Zero

Tabela 4.2 - Características e propriedades de impressão da impressora *Blocks Zero*

Características <i>Hardware</i>	
Dimensões	200x210x300mm
Peso	4,8 kg
Cabeça de extrusão	180-255 °C 0,4 mm
Requisitos de funcionamento	120-220 V
Propriedades de Impressão	
Tecnologia	FDM
Volume de impressão	120x140x120 mm
Espessura das camadas	40 a 300 µm
Velocidade de impressão	Recomendado: 40 mm/s
Material	Filamento 1,75 mm

4.2.2 Blocks One

Na Figura 4.3, pode-se observar a impressora *Blocks One* que utiliza FDM como método de impressão. Na Tabela 4.3 é possível observar algumas características da *Blocks One*.

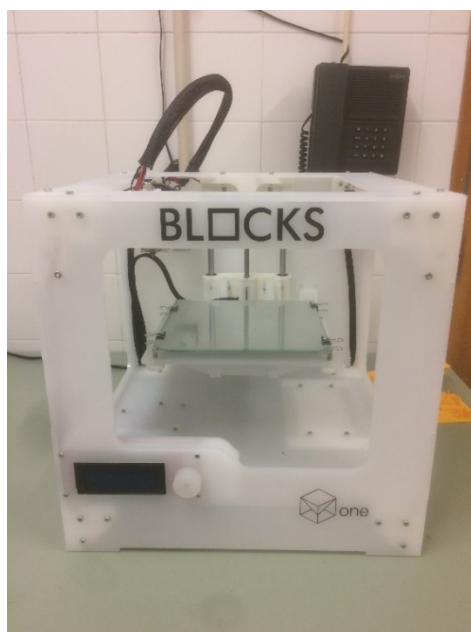


Figura 4.3 - Impressora *Blocks One*

Tabela 4.3 - Características e propriedades de impressão da impressora *Blocks One*

Características <i>Hardware</i>	
Dimensões	400x400x400 mm
Peso	5.5 kg
Cabeça de extrusão	180-260 °C Diâmetro de extrusão 0,4 mm
Requisitos de funcionamento	120-220V
Propriedades de Impressão	
Tecnologia	FDM
Dimensões do tanque	200x200x200 mm
Espessura das camadas	50 a 300 µm
Velocidade de impressão	Recomendado: 60 mm/s Max:80-100 mm/s

4.2.3 Principais Diferenças

Ambas as impressoras pertencem ao mesmo fabricante e utilizam também a mesma tecnologia (FDM). Contudo, possuem algumas diferenças no funcionamento. A principal diferença passa pelo facto de a *Blocks Zero* ser *Core XZ*, tendo a cabeça de extrusão a operar no plano XZ, Figura 4.4, e a *Blocks One* ser *Core XY*, tendo a extrusora a operar no plano XY, Figura 4.5.

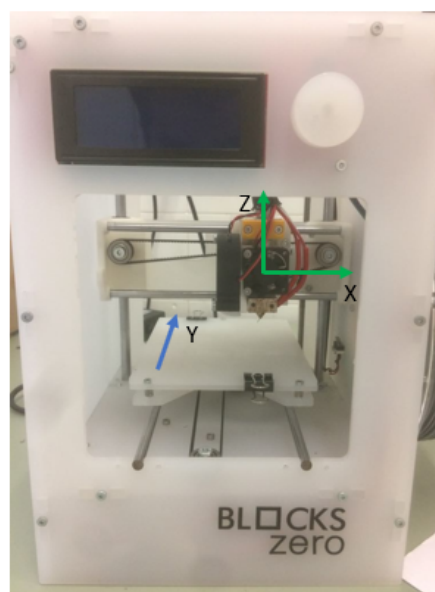
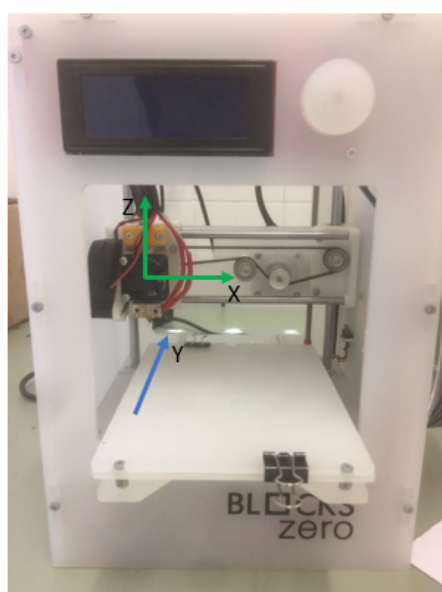


Figura 4.4 - Forma como opera a impressora *Blocks Zero (Core XZ)*

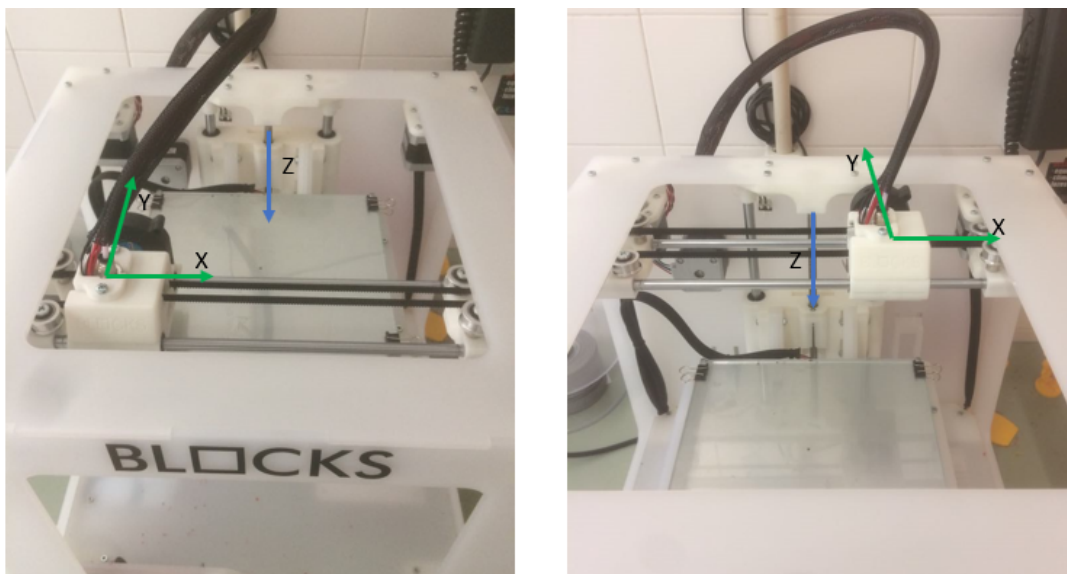


Figura 4.5 - Forma como opera a impressora *Blocks One (Core XY)*

Outra diferença é o facto da Blocks One ter a plataforma de extrusão aquecida, facilitando a adesão da peça à plataforma bem como reduzir o gradiente de temperatura durante a impressão das peças. Na Blocks Zero a plataforma de impressão é uma placa de acrílico. As impressoras diferem também no preço (Blocks One: 750€ e Blocks Zero: 350€)

4.3 Estabelecimento das variáveis a estudar

Esta dissertação tem como objetivo estudar o acabamento superficial e os desvios dimensionais obtidos nos 3 eixos ortogonais das impressoras. Para tal foram seleccionadas as seguintes respostas a estudar:

- Rugosidade na face A do provete (Rugosidade A)
- Rugosidade na face B do provete (Rugosidade B)
- Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo X da impressora (Desvio X)
- Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo Y da impressora (Desvio Y)
- Desvio em relação à cota nominal medido na direção do eixo Z da impressora (Desvio Z)

Posto isto, começou-se por seleccionar todas as variáveis que poderiam influenciar quer o acabamento superficial, quer as dimensões das peças produzidas, reunindo as seguintes variáveis:

- Espessura de Camada (E_c)
- Percentagem de *Infill* (I)

- Velocidade de Impressão (v)
- Temperatura de Extrusão (T)
- Dimensão (D) do provete – somente utilizada no estudo dos desvios dimensionais e adicionada posteriormente ao *screening*
- Orientação (θ) - somente utilizada no estudo das rugosidades

Devido à existência de numerosas variáveis e desconhecendo qual o contributo de cada uma para as respostas a estudar, deve ser realizada uma experiência de *screening* por forma a reduzir o número de variáveis presentes no planeamento experimental, selecionando apenas as que apresentam efeitos mais significativos no sistema [30].

4.4 Provete utilizados

Na experiência de triagem era importante que o provete selecionado servisse para realizar o *screening* tanto para o estudo do acabamento superficial bem como para o estudo dos desvios dimensionais. Tendo esta condição em consideração projetaram-se cubos com 15mm de aresta, Figura 4.6, para realizar o *screening* das variáveis.

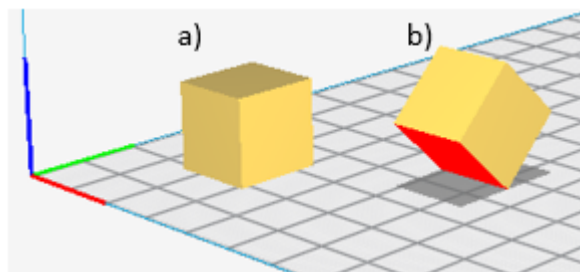


Figura 4.6 – Representação dos provetes produzidos para a experiência de *screening* no programa CURA, a) Orientação: 0° , b) Orientação: 45° .

Com este provete não só é possível medir as rugosidades nas faces, mas também medir as dimensões segundo cada eixo ortogonal da máquina (utilizando apenas os provetes a), com a variável orientação igual a 0°).

Já para aplicar a RSM foram utilizados provetes diferentes para o estudo do acabamento superficial e para o estudo dos desvios dimensionais. Para estudar o acabamento superficial mantiveram-se os provetes cúbicos, contudo, diminuíram-se as suas dimensões passando a ter 10 mm de aresta (Figura 4.7).

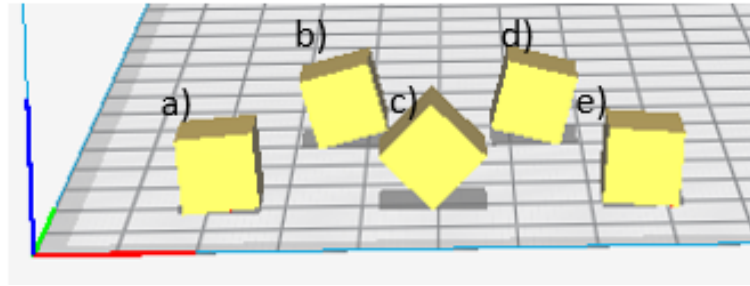


Figura 4.7 - Representação dos provetes usados no estudo das rugosidades no programa CURA a) Orientação:95° b) Orientação:15° c) Orientação:45° d) Orientação:75°e) Orientação: -5°.

Já para o estudo dos desvios dimensionais optou-se, por uma peça semelhante a um referencial, Figura 4.8, tendo como área de secção transversal 16 mm^2 em cada eixo.

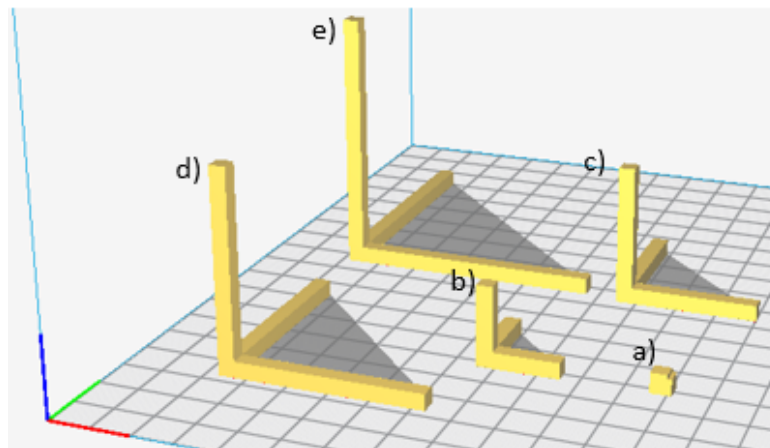


Figura 4.8 - Representação dos provetes usado no estudo dos desvios dimensionais no programa CURA. a) 5mm b) 20mm c) 35mm d) 50mm e) 65mm.

4.5 Etapas do Procedimento Experimental

Na Figura 4.9 é possível observar uma sequência de imagens que ilustra as várias etapas do procedimento experimental bem como a ordem pela qual foram realizadas.

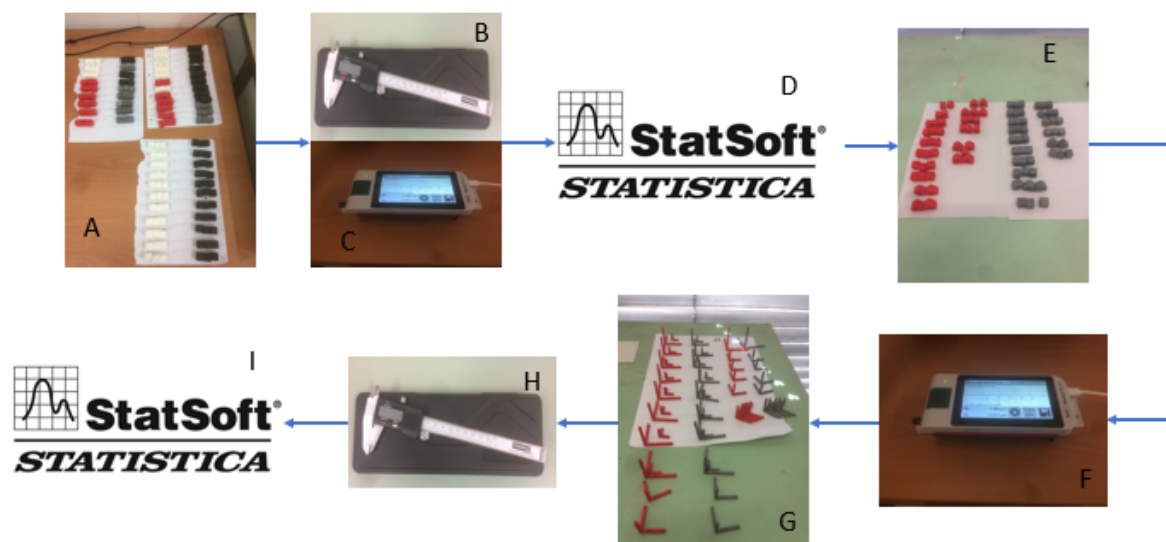


Figura 4.9 - Sequência de imagens que representa as várias etapas do procedimento experimental bem como a ordem em que estas foram realizadas

- A- Impressão dos provetes para a experiência de *screening*
- B- Medição da dimensão dos provetes
- C- Medição da rugosidade dos provetes
- D- Tratamento estatístico da experiência de *screening*
- E- Impressão dos provetes para a RSM (estudo do acabamento superficial)
- F- Medição das rugosidades dos provetes (E)
- G- Impressão dos provetes para RSM (estudo da evolução dos desvios dimensionais)
- H- Medição da dimensão dos provetes (G)
- I- Tratamento estatístico RSM (usando o *Central Composite Design*)

É necessário referir que antes de iniciar as etapas A, E e G (impressões) foram realizados os planeamentos das experiências, definindo quais as variáveis e seus níveis. Imediatamente após as impressões os provetes foram todos numerados e identificados.

4.6 Planeamento das experiências

4.6.1 Screening

Devido à existência de numerosas variáveis, reitera-se que deve ser realizada uma experiência de *screening* para reduzir o número de variáveis, utilizando apenas as que mais têm influência no sistema. Conforme previamente mencionado, inicialmente selecionaram $k = 5$ variáveis e para reduzir esse

número foi realizada a experiência expressa na Tabela 4.4 que corresponde à matriz de planeamento fatorial $2^5 = 32$ experiências e apresenta as seguintes características:

- Os números -1 e 1 correspondem a uma diminuição ou a um aumento percentual, respetivamente, em relação ao valor nominal previamente definido;
- Os valores nominais, definidos para cada variável são: Espessura de camada (0.15mm), Percentagem de *infill* (50%), Velocidade de impressão (40mm/s na Blocks Zero e 60mm/s na Blocks One – Valores correspondentes com as velocidades recomendadas pelo fabricante), Temperatura (210°C) e Orientação (22.5°).

Nota: O valor nominal definido para a orientação foi definido como 22.5° propositadamente para poder estudar os valores de 0 e 45 graus;

- Cada provete foi impresso 3 vezes de forma a obter resultados experimentais mais fidedignos e reduzir o erro experimental;
- Todos os ensaios foram realizados de forma aleatória para prevenir a influência de efeitos externos à experiência como é o caso do efeito de aquecimento da impressora.

Tabela 4.4 - Matriz planeamento fatorial 2^5 representando o aumento e a diminuição dos parâmetros a avaliar (Estudo do acabamento superficial)

Ensaio n°	Espessura de camada	Percentagem de infill	Velocidade de impressão	Temperatura de extrusão	Orientação
1	-1	-1	-1	1	-1
2	1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	1	-1
4	-1	-1	1	1	-1
5	-1	-1	-1	-1	-1
6	1	1	-1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1
8	1	-1	-1	-1	-1
9	-1	1	1	1	-1
10	-1	1	-1	-1	-1
11	-1	-1	1	-1	-1
12	1	1	1	1	-1
13	1	1	-1	-1	-1
14	1	-1	1	-1	-1
15	-1	1	1	-1	-1
16	1	1	1	-1	-1
17	-1	-1	-1	1	1
18	1	-1	-1	1	1
19	-1	1	-1	1	1
20	-1	-1	1	1	1
21	-1	-1	-1	-1	1
22	1	1	-1	1	1
23	1	-1	1	1	1
24	1	-1	-1	-1	1
25	-1	1	1	1	1
26	-1	1	-1	-1	1
27	-1	-1	1	-1	1
28	1	1	1	1	1
29	1	1	-1	-1	1
30	1	-1	1	-1	1
31	-1	1	1	-1	1
32	1	1	1	-1	1

Nesta experiência foram medidos os seguintes outputs: Rugosidade A, Rugosidade B.

A orientação não foi utilizada como variável na experiência de *screening* do estudo dos desvios dimensionais pelo que, neste caso, apenas se consideraram as impressas a zero graus (valor -1 do fator orientação na tabela acima), isto é, com a face mais elevada paralela à mesa de impressão, considerando apenas uma matriz de planeamento fatorial $2^4 = 16$ experiências, Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Matriz planeamento fatorial 2^4 representando o aumento e a diminuição dos parametros a avaliar (Estudo dos desvios dimensionais)

Ensaio nº	Espessura	% Infill	Velocidade	Temperatura
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

Nesta experiência foram mediadas as respostas: Desvio X, Desvio Y e Desvio Z

4.6.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Após a obtenção dos resultados da experiência de *screening* que permitiram saber quais as variáveis influentes do sistema, foram preparadas duas novas experiências, uma para o estudo do acabamento superficial, outra para o estudo dos desvios dimensionais.

Estudo das Rugosidades

Apresenta-se a Tabela 4.6 onde estão presentes os fatores influentes para a rugosidade na face A e na face B bem como o seu valor codificado para cada nível do fator.

Tabela 4.6 - Valores usados para cada nível das variáveis usadas no estudo do acabamento superficial

Fator	Nível				
	-1.682	-1	0	1	1.682
Espessura de camada [mm]	0.05	0.7	0.1	0.13	0.15
Velocidade de Impressão [mm/s]	8	25	50	75	92
Orientação [°]	-5	15	45	75	95

De seguida apresenta-se a matriz planeamento de experiências para um CCD com 3 variáveis, Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Matriz planeamento de experiências para um CCD com 3 variáveis (Estudo do acabamento superficial)

Ensaio nº	Espessura	Velocidade	Orientação
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1.682	0	0
10	1.682	0	0
11	0	-1.682	0
12	0	1.682	0
13	0	0	1.682
14	0	0	-1.682
15	0	0	0

Estudo dos desvios dimensionais

Apresenta-se a Tabela 4.8 onde estão presentes os fatores influentes bem como o seu valor codificado para cada nível do fator.

Tabela 4.8 - Valores usados para cada nível das variáveis usadas no estudo dos desvios dimensionais

Fator	Nível				
	-2	-1	0	1	2
Dimensão [mm]	5	20	35	50	65
Espessura de camada [mm]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
Velocidade de Impressão [mm/s]	10	30	50	70	90
Temperatura de Extrusão [°C]	200	205	210	215	220

De seguida apresenta-se a matriz para um CCD com 4 variáveis, Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Matriz planeamento de experiências para um CCD com 4 variáveis (Estudo dos desvios dimensionais)

Ensaio nº	Dimensão	Espessura	Velocidade	Temperatura
1	-1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	-1	-1	1	1
4	1	-1	1	1
5	-1	1	-1	1
6	1	1	-1	1
7	-1	-1	-1	1
8	1	-1	-1	1
9	-1	1	1	-1
10	1	1	1	-1
11	-1	-1	1	-1
12	1	-1	1	-1
13	-1	1	-1	-1
14	1	1	-1	-1
15	-1	-1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1
17	-2	0	0	0
18	2	0	0	0
19	0	-2	0	0
20	0	2	0	0
21	0	0	-2	0
22	0	0	2	0
23	0	0	0	-2
24	0	0	0	2
25	0	0	0	0

4.7 Avaliação Dimensional dos Provetes

Para proceder à avaliação dimensional dos provetes produzidos pelas impressoras foi utilizado um paquímetro digital da marca Powerfix, Figura 4.10. Este instrumento tem uma resolução de 0,01mm e uma precisão de $\pm 0,02\text{mm}$



Figura 4.10 - Paquímetro digital utilizado na avaliação dimensional dos provetes

4.8 Avaliação do Acabamento Superficial

4.8.1 Introdução teórica

Nenhuma superfície manufaturada, embora possa parecer a olho nu, é absolutamente perfeita. Surge então o termo acabamento superficial que se refere às irregularidades produzidas nas superfícies dos componentes durante o seu processo de fabrico.

O acabamento superficial é caracterizado pela rugosidade que apresenta, sendo o mais comum apresentar R_a , que representa a média aritmética entre os picos e vales ao longo de um determinado comprimento de uma superfície [35].

Por convenção, a topologia da superfície de uma peça é composta por dois componentes: a rugosidade e a ondulação. A rugosidade está relacionada com as irregularidades características do processo de fabrico, já a ondulação são irregularidades mais espaçadas que frequentemente são produzidas por vibrações induzidas pelo processo de fabrico. O termo “acabamento superficial” e o termo “rugosidade” são usados muitas vezes como sinónimos uma vez a rugosidade é quantificada muito mais frequentemente que a ondulação [36].

Qualquer peça deve ter um acabamento superficial adequado à função a que se destina, pelo que, o acabamento superficial deve ser tanto melhor quanto maiores forem as exigências na qualidade superficial da peça [37].

De todos os parâmetros de rugosidade existentes, os mais utilizados são R_a, R_t, R_z, R_{max} . R_t representa a altura máxima da rugosidade em todo o comprimento de leitura, R_z representa a média e alturas de picos em pontos distintos do comprimento de leitura e R_{max} representa a altura máxima das irregularidades do perfil.

Contudo, destes cinco parâmetros principais R_a é o mais utilizado, mas não é suficiente para definir o perfil da rugosidade da superfície, uma vez que superfícies com diferentes perfis podem ter o mesmo valor de R_a conforme se pode observar na Figura 4.11 [38].

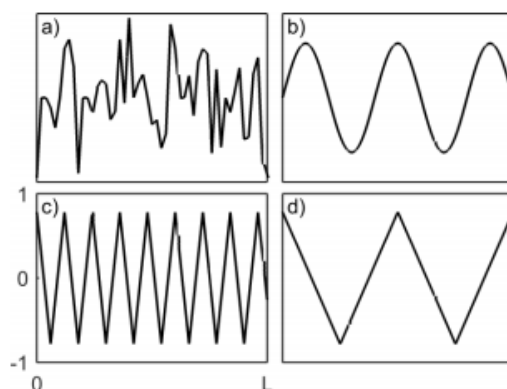


Figura 4.11 Ilustração de 4 perfis de rugosidade diferentes com o mesmo R_a . a) soma de 10 curvas sinusoidais, b) curva sinusoidal pura, c) e d) curvas com padrão dente de serra com alta e baixa frequência, respetivamente [39].

O interesse neste parâmetro (R_a : Rugosidade média) refere-se ao facto de possibilitar a comparação do acabamento superficial em diferentes superfícies [38], sendo por este motivo, o parâmetro seleccionado para estudar e comparar os acabamentos superficiais nos provetes impressos pelas duas impressoras.

Conforme dito anteriormente o parâmetro principal é o R_a sendo este permite a divisão das superfícies em classes (N). As diferentes classes de rugosidades podem ser observadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Classes de rugosidade e correspondentes valores da rugosidade[40]

Número da classe de rugosidade	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	12
Valor da rugosidade (μm)	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50

*de acordo com a Norma ISO 1302:2002

4.8.2 Procedimento experimental

Para determinar a qualidade e o tipo de acabamento superficial dos provetes produzidos foram realizadas medições, todas elas perpendiculares às estrias presentes na superfície das peças, características do processo de MA usando FDM, com um rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf PS 10, ilustrado na Figura 4.12.



Figura 4.12 - Rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf PS 10

Discussão dos Resultados Experimentais

5.1 Experiência de *Screening*

Após a impressão de 96 provetes (estudo das rugosidades) em cada impressora, procedeu-se à avaliação dimensional e à medição das rugosidades das superfícies. A avaliação dimensional foi só realizada aos provetes impressos com orientação igual a zero graus, isto é, a 48 provetes (estudo dos desvios dimensionais) em cada impressora.

A avaliação dimensional foi realizada medindo o provete de acordo com os 3 eixos ortogonais das impressoras, sendo então realizado um total de 144 medições por impressora. Já para o acabamento superficial foram medidas as rugosidades em duas faces de cada provete sendo realizadas um total 192 medições de rugosidades por impressora.

Os resultados obtidos na experiência de *screening* bem como a análise de variância (ANOVA) estão disponíveis no Anexo A (*screening* do estudo do acabamento superficial) e no Anexo B (*screening* do estudo dos desvios dimensionais) para consulta.

Uma vez que o objetivo desta dissertação é a comparação das impressoras, é necessário que quer as variáveis quer os níveis escolhidos para o planeamento de experiências sejam os mesmos. Posto isto, as variáveis selecionadas para aplicar a metodologia da superfície de resposta são a união dos conjuntos das variáveis consideradas significativas presentes na Tabela 5.1.

Apresenta-se a Tabela 5.1 que contém a informação resumida da experiência de triagem, indicando quais as variáveis de seguem para a experiência final.

Tabela 5.1 - Respostas a estudar na experiência final

		Respostas em estudo				
		Rugosidade A	Rugosidade B	Desvio X	Desvio Y	Desvio Z
Variáveis influentes (<i>Screening</i>)	Blocks Zero	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada
		Orientação	Orientação	Velocidade de impressão	-	Velocidade de impressão
		Velocidade de Impressão	-	Temperatura de extrusão	-	-
	Blocks One	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada	Espessura de Camada
		Orientação	Orientação	Velocidade de impressão	Velocidade de impressão	Velocidade de impressão
		Velocidade de Impressão	-	-	-	-
Variáveis para RSM	Blocks Zero e Blocks One	Espessura de Camada		Espessura de Camada		
		Orientação		Velocidade de impressão		
		Velocidade de Impressão		Temperatura de extrusão		
		-		Dimensão*		

*Esta variável não entrou no *screening*. O *screening* do estudo dos desvios dimensionais incidiu principalmente em compreender quais os parâmetros de impressão que afetavam as dimensões finais das peças. Esta variável entrou só na experiência final pois já era sabido que os desvios aumentavam com a dimensão das peças.

5.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Realizada a triagem das variáveis realizaram-se as novas experiências, para a aplicação da metodologia da superfície de resposta, apenas com as variáveis que se mostraram significativas. Foram então produzidos, para o estudo do acabamento superficial, 15 provetes diferentes, todos replicados 2 vezes à exceção do ponto zero que foi replicado 4 vezes, perfazendo um total de 47 provetes. As medições, tal como no *screening*, foram apenas em 2 faces, A e B, sendo realizadas 94 medições de rugosidades em cada impressora.

Por fim, no estudo dos desvios dimensionais foram impressos 25 provetes diferentes, apenas replicando o ponto zero 4 vezes, produzindo no total 29 provetes em cada uma das impressoras. De igual modo à experiência de triagem, foram realizadas 3 medições em cada provete, refletindo-se em 87 medições.

5.2.1 Acabamento Superficial

Blocks Zero

Começando pela impressora Blocks Zero apresentam-se as tabelas ANOVA, Tabela 5.2 e Tabela 5.3, obtidas após tratamento estatístico dos resultados, para a Rugosidade A e Rugosidade B, respetivamente. A tabela com os resultados experimentais e a análise residual encontram-se disponibilizados no Anexo C.1.

Tabela 5.2 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A
(Impressora: Blocks Zero)

ANOVA: Var.:Rugosidade A; R-sqr=,83564; Adj.:67128 3 factors, 1 Blocks, 19 Runs; MS Residual=9,978833 DV: Rugosidade A					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada(L)	166,6200	1	166,6200	16,69734	0,002732
Espessura de Camada(Q)	2,0745	1	2,0745	0,20789	0,659232
(2)Velocidade de Impressão(L)	0,1371	1	0,1371	0,01374	0,909269
Velocidade de Impressão(Q)	1,4165	1	1,4165	0,14195	0,715079
(3)Orientação(L)	207,6725	1	207,6725	20,81130	0,001362
Orientação(Q)	34,6545	1	34,6545	3,47280	0,095274
1L by 2L	0,1596	1	0,1596	0,01600	0,902139
1L by 3L	38,4243	1	38,4243	3,85058	0,081344
2L by 3L	0,2845	1	0,2845	0,02851	0,869646
Error	89,8095	9	9,9788		
Total SS	546,4135	18			

Tabela 5.3 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B
(Impressora: Blocks Zero)

ANOVA: Var.:Rugosidade B; R-sqr=,90669; Adj.:81339 3 factors, 1 Blocks, 19 Runs; MS Residual=4,163108 DV: Rugosidade B					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada(L)	110,1440	1	110,1440	26,45716	0,000608
Espessura de Camada(Q)	3,1769	1	3,1769	0,76312	0,405060
(2)Velocidade de Impressão(L)	0,0206	1	0,0206	0,00494	0,945506
Velocidade de Impressão(Q)	5,0127	1	5,0127	1,20407	0,300999
(3)Orientação(L)	196,8589	1	196,8589	47,28653	0,000073
Orientação(Q)	43,4586	1	43,4586	10,43899	0,010307
1L by 2L	0,0857	1	0,0857	0,02059	0,889076
1L by 3L	8,2825	1	8,2825	1,98949	0,192009
2L by 3L	3,1475	1	3,1475	0,75606	0,407157
Error	37,4680	9	4,1631		
Total SS	401,5542	18			

A vermelho, cor automática do programa STATISTICA, estão as variáveis consideradas influentes para a resposta em questão. Estas variáveis são significativas ou não consoante o valor de F ($p-1$, $N-p$, α). Estes valores podem ser todos obtidos pela tabela ANOVA, uma vez que:

- $p-1$, corresponde ao valor “df” (*degrees of freedom*, graus de liberdade em português) para as variáveis em estudo
- $N-p$, corresponde ao valor de “df” indicado no resto (“Error” na tabela ANOVA)
- O valor de α , em todos os casos foi 5% (0.05)

Para que as variáveis sejam consideradas significativas é necessário que as mesmas apresentem um valor de F superior ao valor tabelado na tabela F de *Snedcor* para $\alpha=5\%$,

Com a informação exposta em cima tem-se: $F(1, 9, 0.05) = 5.12$. Isto significa que $F(1, 9) \geq 5.12$ é igual a 5% e que para as variáveis serem consideradas influentes têm de ter um valor de F superior a 5.12.

Nas tabelas ANOVA retiradas do programa STATISTICA estão também indicados os valores “R-sqr” e “Adj” que correspondem respetivamente aos valores R^2 e R_A^2 que são calculados conforme indicado nas Equações 3.7 e 3.8, respetivamente.

Posto isto, observando as tabelas ANOVA referentes às rugosidades A e B, constata-se que para a Rugosidade A têm-se como variáveis influentes a espessura de camada (linear) e a orientação (linear).

Já para a rugosidade na face B as variáveis foram as mesmas com o acréscimo da orientação (quadrática).

Por forma a entender melhor a significância de cada variável na resposta em estudo apresentam-se os gráficos de Pareto, Figura 5.1 e Figura 5.2, referentes à Rugosidade A e à Rugosidade B, respetivamente. Neles está evidenciada a importância de cada variável bem como a importância da interação entre as mesmas. Cada valor é apresentado em função do valor adimensional da função “t”.

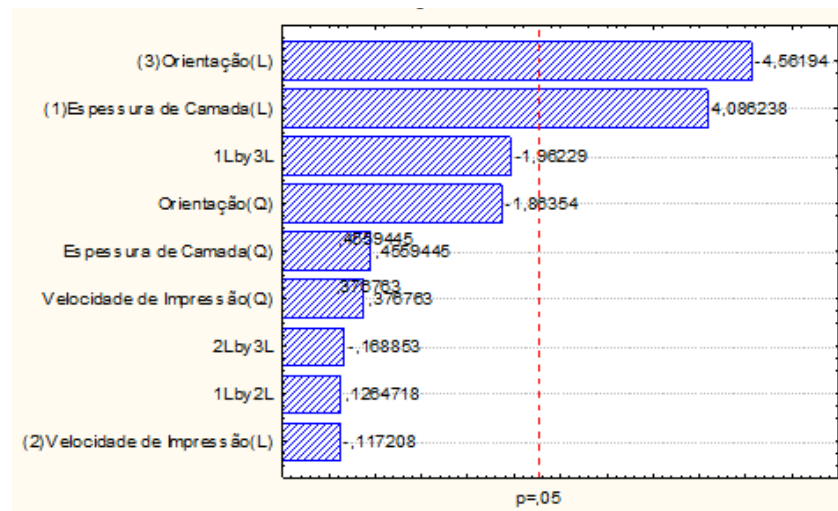


Figura 5.1 – Gráfico de Pareto para a Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero)

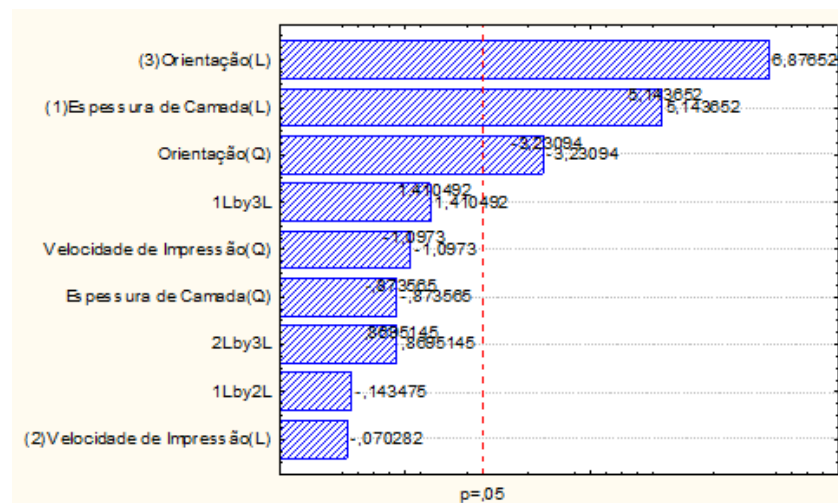


Figura 5.2 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade B (Impressora: Blocks Zero)

É possível observar uma linha vertical nos gráficos de Pareto, comum a todos os gráficos. Esta linha indica o ponto a partir do qual se verifica a relação $|t| > x$ (termo x retirado da tabela t student,

Tabela 3.1), identificando desta forma os termos significativos da regressão com um intervalo de confiança de 95%.

O sinal de t pode ser positivo ou negativo indicando se o termo influencia a resposta crescente ou decrescentemente, respetivamente.

As próximas figuras representam a superfície de resposta em função de duas variáveis. Estas superfícies permitem interpretar melhor os resultados, uma vez que dão a entender qual será a resposta para qualquer combinação de valores dos dois fatores. Apenas serão apresentadas as superfícies de respostas em função das variáveis consideradas significativas.

A Figura 5.3 representa a superfície de resposta para a rugosidade na face A em função das variáveis: espessura de camada e orientação.

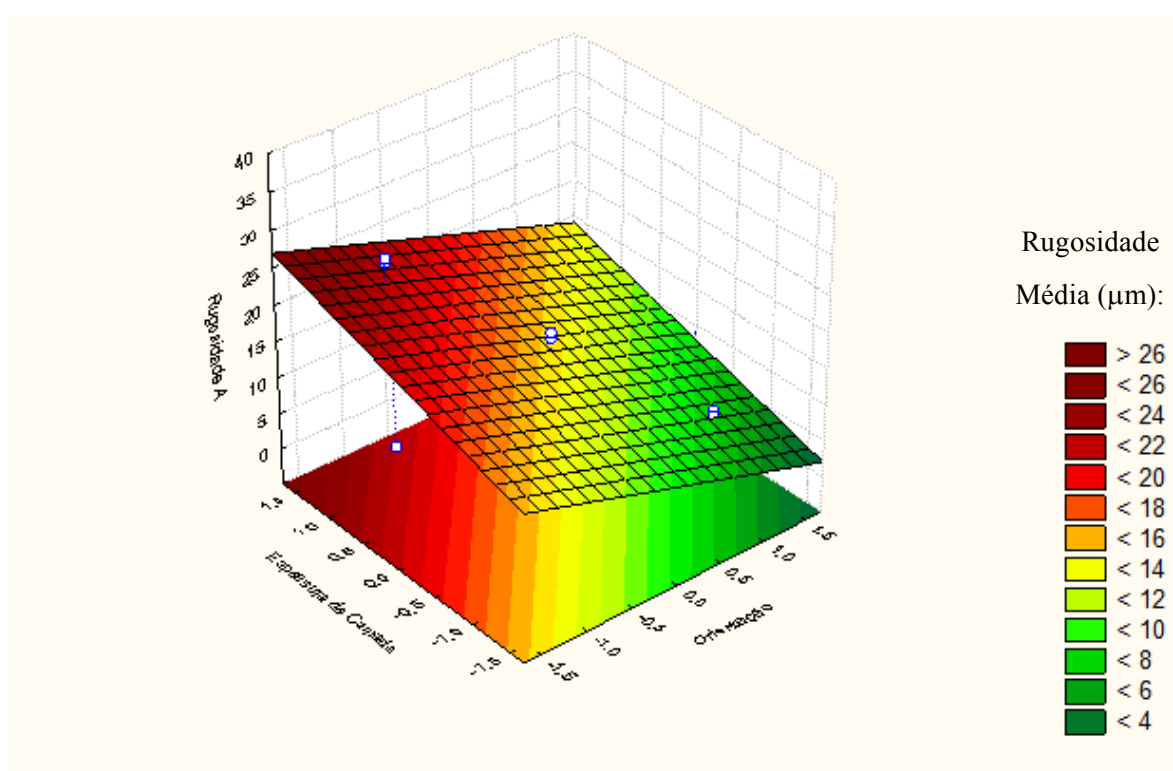


Figura 5.3 - Superfície de resposta para a Rugosidade A em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks Zero)

Após análise da superfície conclui-se que a rugosidade máxima ocorre quando a espessura de camada é máxima e a orientação é mínima, caso em que a face se encontra quase paralela à plataforma de impressão. Por sua vez, a menor rugosidade, obtém-se conjugando uma espessura de camada mínima e uma orientação máxima, caso em que a face é quase perpendicular à plataforma de extrusão.

Presente na Figura 5.4 está a superfície de resposta para a rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação.

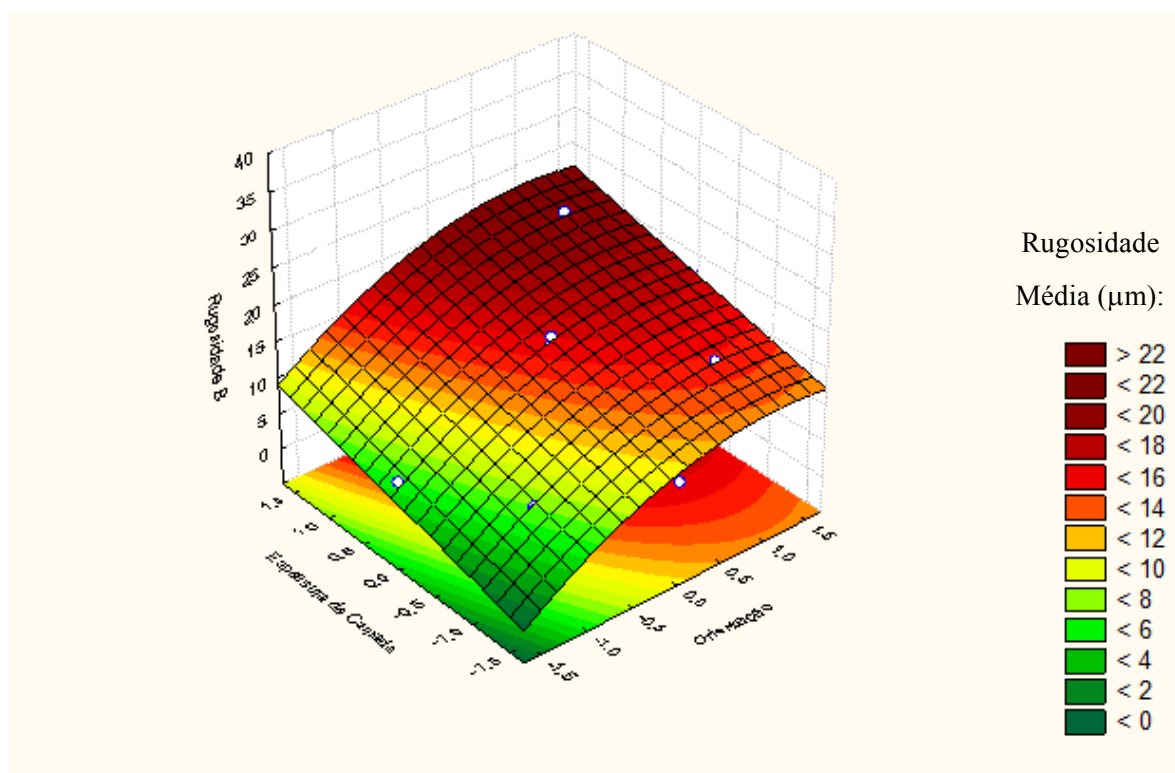


Figura 5.4 - Superfície de resposta para a Rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: *Blocks Zero*)

A partir da análise do gráfico acima apresentado, verifica-se que a rugosidade máxima se dá quando a espessura de camada é máxima e a orientação é máxima, estando a face numa posição quase paralela à mesa de impressão, situação em que o efeito escada é mais visível. Já a rugosidade mínima obtém-se através da conjugação de uma espessura de camada mínima e de uma orientação mínima (face em posição aproximadamente perpendicular à mesa de impressão).

Os modelos empíricos resultantes da aplicação do RSM usados para estimar a rugosidade na face A e a rugosidade na face B em provetes produzidos pela impressora *Blocks Zero* estão disponíveis na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B usando a impressora *Blocks Zero*

$Rug_{A(Zero)} = 15.164 + 3.493E_c - 3.899\theta$	$R^2 = 0,83564$ $R_A^2 = 0,67128$
$Rug_{B(Zero)} = 16.183 + 2.840E_c + 3.796\theta - 1.784\theta^2$	$R^2 = 0,90669$ $R_A^2 = 0,81339$

Validação dos modelos empíricos (*Blocks Zero*)

Na Tabela 5.5 apresentam-se os resultados dos testes realizados para proceder à validação dos modelos matemáticos obtidos pela aplicação do RSM. Para esta validação foram seleccionados 5 pontos ao acaso.

Tabela 5.5 - Testes realizados na validação dos modelos empíricos para as rugosidades obtidas em provetes produzidos na impressora *Blocks Zero*

E_c	θ	Rugosidade A (Modelo)	Rugosidade B (Modelo)	Rugosidade A obtida	Rugosidade B obtida	Diferença Percentual A	Diferença Percentual B
0	-0,5	17,114	13,839	21,230	15,742	-20,852 %	-13,751 %
0	0,5	13,215	17,635	11,547	15,146	12,622 %	14,114 %
1,682	0	21,039	20,960	25,316	19,841	-20,329 %	10, 110 %
-1	-1	15,570	7,763	17,983	6,175	-15,498 %	20,456 %
0,667	1	13,595	20,089	12,946	15,992	4,774 %	20, 394 %

Para uma melhor análise apresentam-se as Figura 5.5 e Figura 5.6 que comparam o valor obtido experimentalmente com o valor previsto pelo modelo empírico para as respostas Rugosidade A e Rugosidade B, respetivamente.

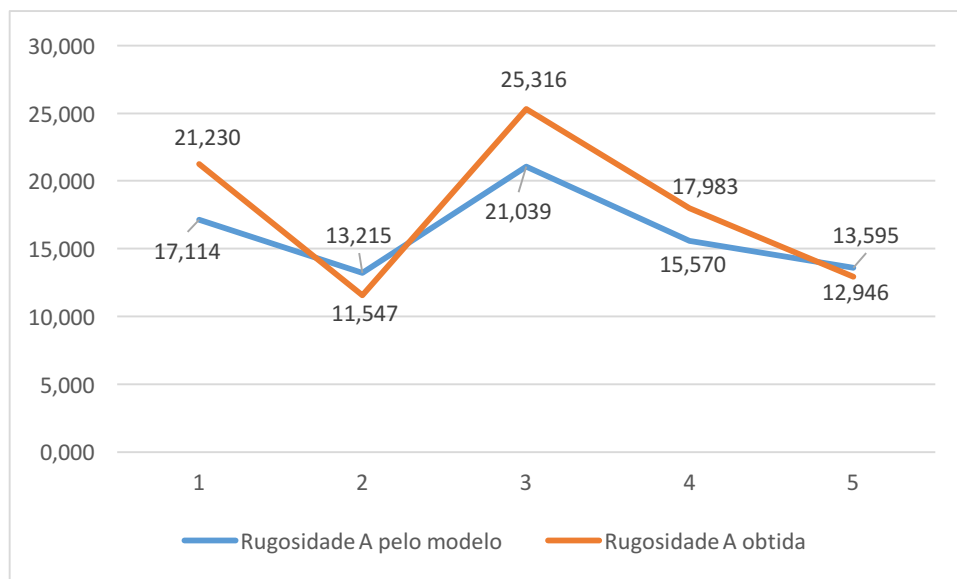


Figura 5.5 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade A (Impressora: *Blocks Zero*)

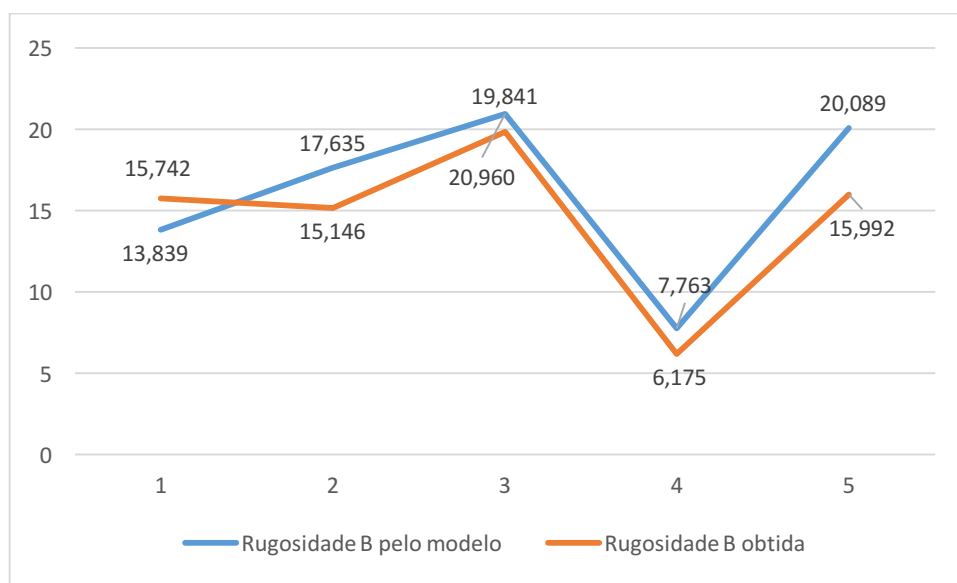


Figura 5.6 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade B (Impressora: *Blocks Zero*)

Olhando para os gráficos o comportamento das retas é semelhante. Contudo, para certos pontos os modelos fazem boas aproximações, mas também existem certos pontos em que os valores se afastam um pouco do previsto. Conclui-se que o modelo não é totalmente adequado, mas é uma aproximação.

Blocks One

Introduzindo os resultados, disponíveis para consulta no Anexo C.2, no programa STATISTICA realizaram-se as análises de variância que indicam as variáveis consideradas influentes para as rugosidades nas faces A e B. Na Tabela 5.6 está presente a tabela ANOVA da rugosidade na face A. Na Tabela 5.7 apresenta-se a tabela ANOVA que contém a análise de variância da resposta Rugosidade B.

Tabela 5.6 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A
(Impressora: Blocks One)

ANOVA; Var.:Rugosidade A; R-sqr=.88624; Adj.:.7724 3 factors, 1 Blocks, 19 Runs; MS Residual=7,544867 DV: Rugosidade A					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada(L)	213,7238	1	213,7238	28,32704	0,000480
Espessura de Camada(Q)	2,4625	1	2,4625	0,32638	0,581783
(2)Velocidade de Impressão(L)	0,1025	1	0,1025	0,01359	0,909756
Velocidade de Impressão(Q)	5,6092	1	5,6092	0,74345	0,410944
(3)Orientação(L)	264,9527	1	264,9527	35,11694	0,000222
Orientação(Q)	0,3609	1	0,3609	0,04783	0,831765
1L by 2L	0,0320	1	0,0320	0,00425	0,949461
1L by 3L	39,4020	1	39,4020	5,22236	0,048147
2L by 3L	3,6266	1	3,6266	0,48067	0,505617
Error	67,9038	9	7,5449		
Total SS	596,8863	18			

Tabela 5.7 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B
(Impressora: Blocks One)

ANOVA; Var.:Rugosidade B; R-sqr=.83203; Adj.:.6640 3 factors, 1 Blocks, 19 Runs; MS Residual=11,91756 DV: Rugosidade B					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada(L)	221,1453	1	221,1453	18,55626	0,001968
Espessura de Camada(Q)	4,1455	1	4,1455	0,34784	0,569844
(2)Velocidade de Impressão(L)	1,7255	1	1,7255	0,14479	0,712392
Velocidade de Impressão(Q)	6,2323	1	6,2323	0,52295	0,487952
(3)Orientação(L)	255,6618	1	255,6618	21,45252	0,001234
Orientação(Q)	0,3440	1	0,3440	0,02886	0,868852
1L by 2L	0,0527	1	0,0527	0,00442	0,948459
1L by 3L	42,0643	1	42,0643	3,52961	0,092995
2L by 3L	0,1576	1	0,1576	0,01323	0,910961
Error	107,2581	9	11,9176		
Total SS	638,5610	18			

Tem-se então como variáveis significativas para a Rugosidade A a espessura de camada (linear), a orientação (linear) e a interação entre as mesmas. Para a Rugosidade B foram consideradas como significativas as mesmas variáveis que na rugosidade A, com exceção da interação entre a espessura de camada e a orientação.

Conforme previamente mencionado os gráficos de *Pareto* permitem uma melhor interpretação da influência de cada variável na resposta em estudo. Os gráficos de *Pareto* referentes as rugosidades A e B dos provetes produzidos pela impressora Blocks One estão presentes na Figura 5.7 e Figura 5.8, respetivamente.

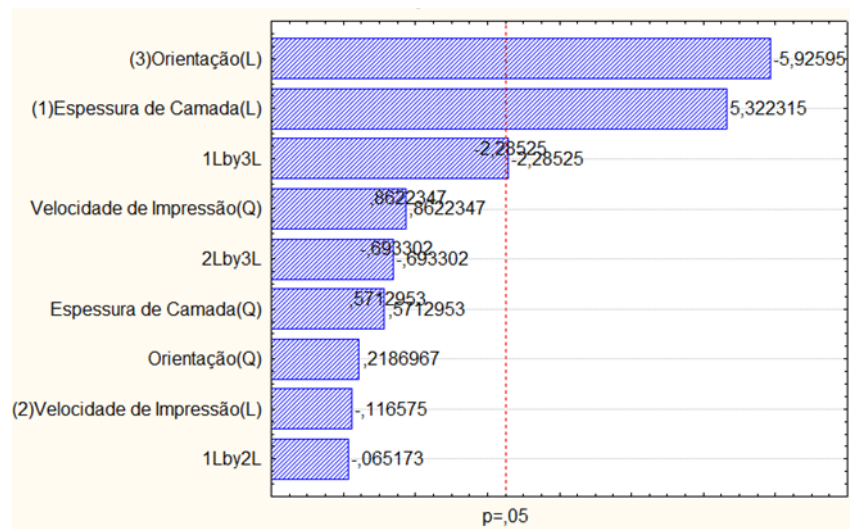


Figura 5.7 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

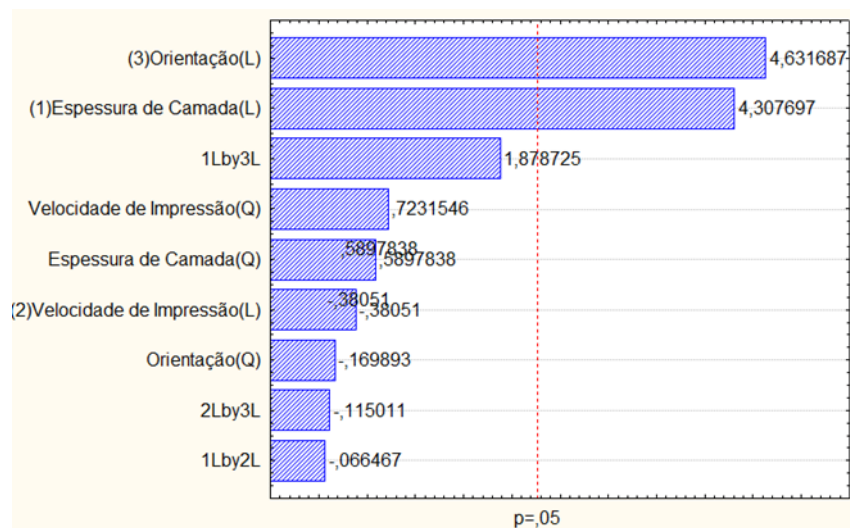


Figura 5.8 - Gráfico de Pareto para a Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

Apresentam-se de seguida as superfícies de resposta para as Rugosidades A e B em função das variáveis significativas.

A Figura 5.9 representa a superfície de resposta para a Rugosidade A em função da espessura de camada e da orientação.

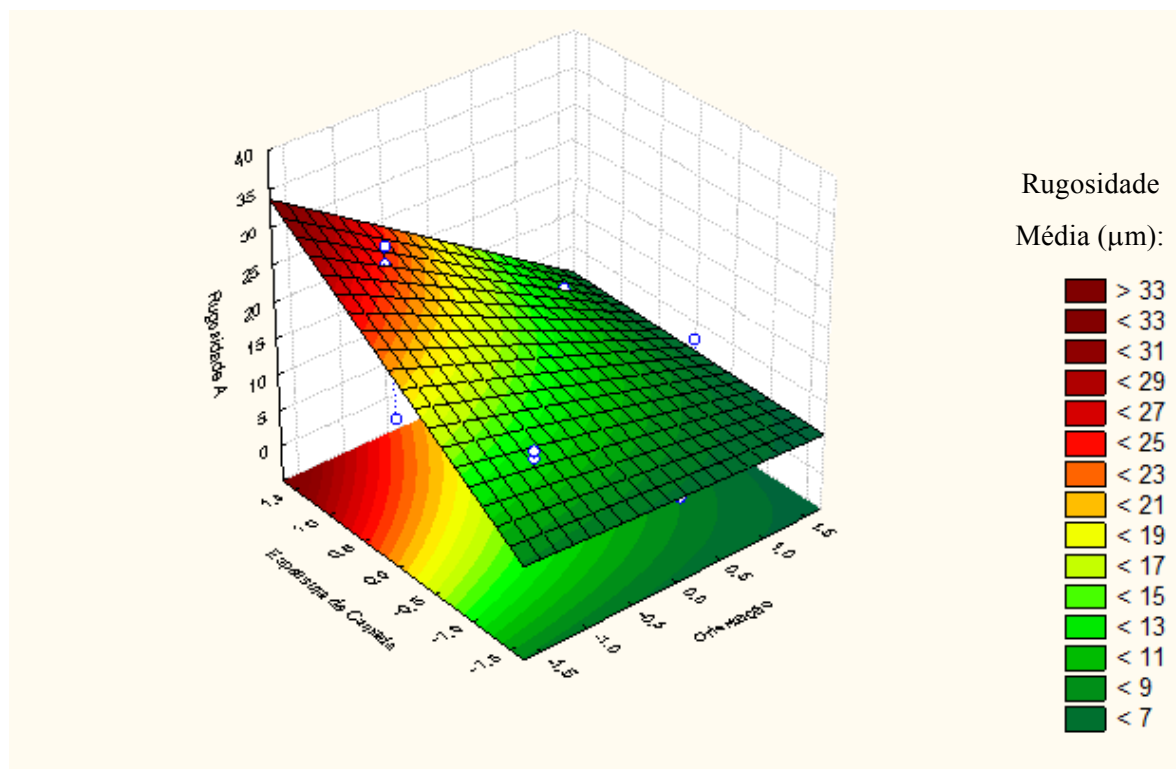


Figura 5.9 - Superfície de resposta para a Rugosidade A em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks One)

Analisando o gráfico acima representado, conclui-se que para que se obtenha uma rugosidade mínima, é necessária uma conjugação de uma espessura de camada mínima e de uma orientação mínima, situação em que a face é aproximadamente perpendicular à plataforma de extrusão. A rugosidade máxima é obtida com a junção de valores altos de espessura de camada com a orientação mínima (caso em que a face está aproximadamente paralela à plataforma de impressão, apresentando um efeito de escada acentuado).

Na Figura 5.10 esta presente a superfície de resposta para a Rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação.

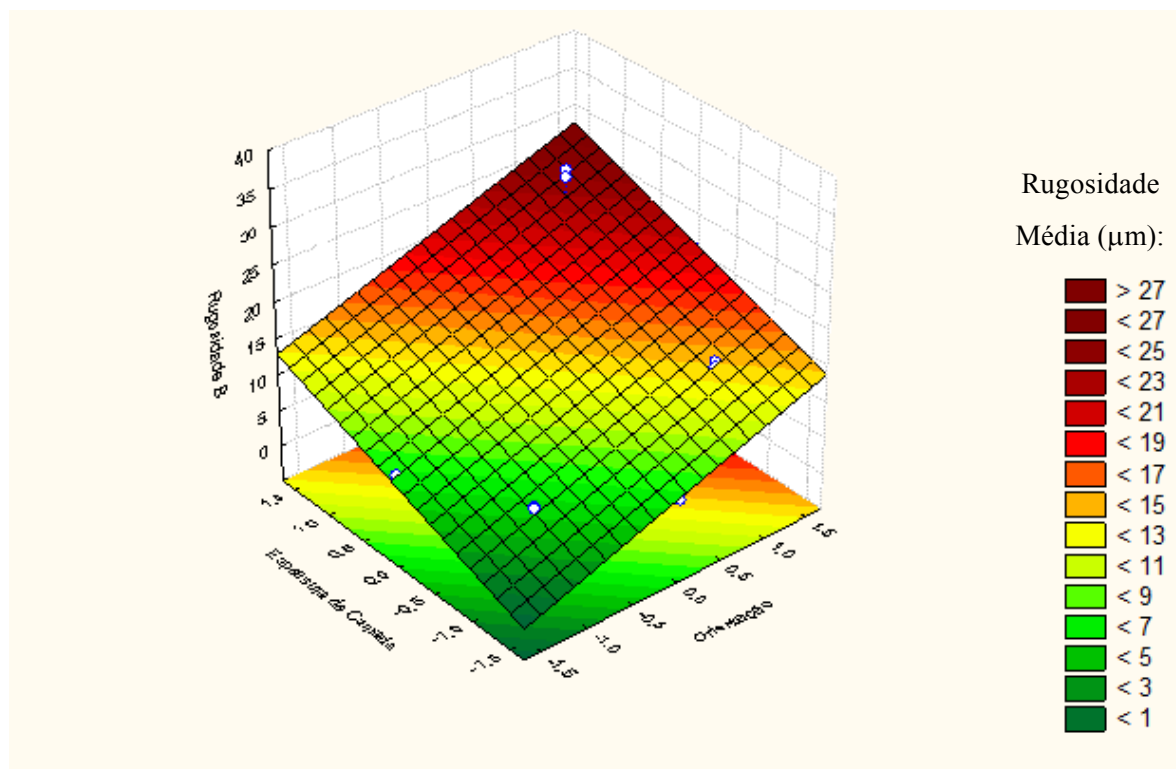


Figura 5.10 - Superfície de resposta para a Rugosidade B em função da espessura de camada e da orientação (Impressora: Blocks One)

Ao observar a figura acima ilustrada, é possível verificar que o valor de rugosidade máxima surge quando a espessura de camada é máxima e a orientação é máxima (face aproximadamente paralela à cama de impressão). Por outro lado, a rugosidade mínima obtém-se através da conjugação de uma espessura de camada mínima e de uma orientação mínima, posição em que a face está aproximadamente perpendicular à plataforma de impressão.

Os modelos empíricos resultantes da aplicação do RSM usados para estimar as repostas em estudos na impressora Blocks One estão disponíveis na Tabela 5.8 .

Tabela 5.8 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B usando a impressora Blocks One

$Rug_{A(One)} = 12.417 + 3.956x_1 - 4.404x_3 - 2.219x_1x_3$	$R^2 = 0,88624$ $R_A^2 = 0,77247$
$Rug_{B(One)} = 12.574 + 4.024x_1 + 4.326x_3$	$R^2 = 0,83203$ $R_A^2 = 0,66406$

Validação dos modelos empíricos (Blocks One)

Na Tabela 5.9 apresentam-se os resultados dos testes realizados para proceder à validação dos modelos matemáticos obtidos pela aplicação do RSM.

Tabela 5.9 - Testes realizados na validação dos modelos empíricos para as rugosidades obtidas em provetes produzidos na impressora Blocks One

Ec	θ	Rugosidade A (Modelo)	Rugosidade B (Modelo)	Rugosidade A obtida	Rugosidade B obtida	Diferença percentual A	Diferença percentual B
0	-0,5	14,619	10,411	20,364	10,549	-39,328	-1,326
0	0,5	10,215	14,737	10,136	18,891	0,773	-28,188
1,682	0	19,071	19,342	20,864	20,661	-9,402	-6,819
-1	-1	10,646	4,224	14,523	4,63	-36,417	-9,612
0,667	1	9,172	19,584	7,325	24,514	20,137	-25,174

Para providenciar uma melhor análise apresentam-se os gráficos ilustrados nas Figura 5.11e Figura 5.12, onde se comparam os valores obtidos experimentalmente com os valores previstos pelos modelos empíricos das respostas: Rugosidade A e Rugosidade B, respetivamente.

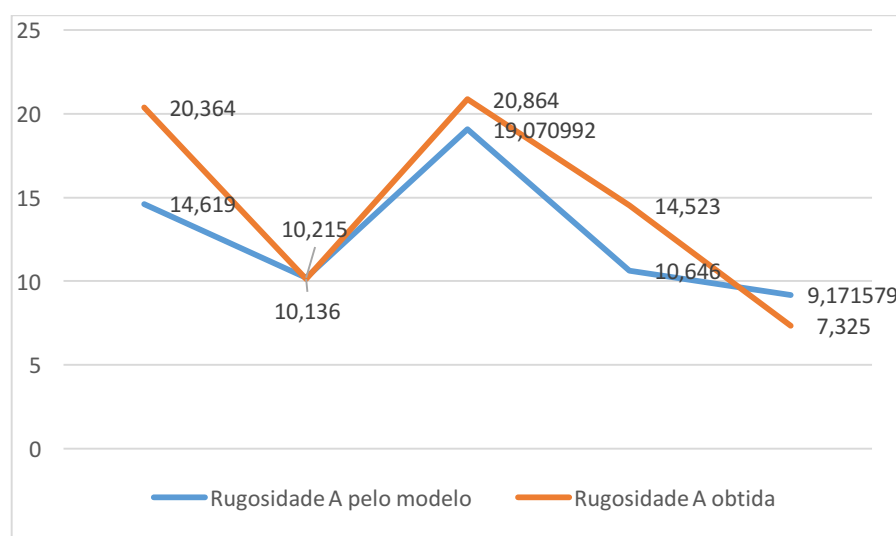


Figura 5.11 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

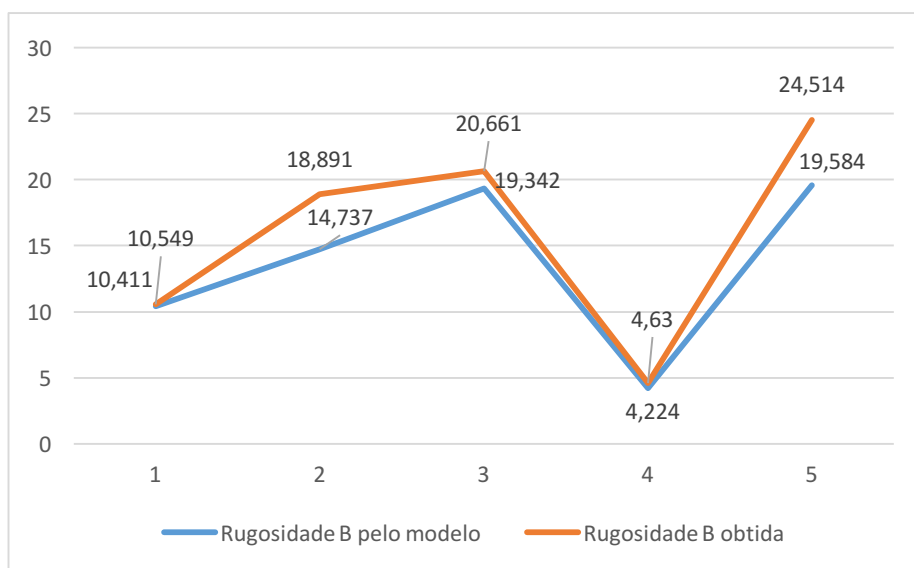


Figura 5.12 - Comparação dos resultados obtidos com o valor previsto pelo modelo empírico para a Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

O comportamento apresentado nos dois casos é semelhante. Alguns valores previstos corresponderam aos obtidos experimentalmente, contudo também existem casos em que os valores diferem um pouco. Pelo que, pode-se concluir que o modelo não é completamente adequado, correspondendo a uma aproximação da realidade.

Comparação dos resultados obtidos nas duas impressoras

As superfícies atrás disponíveis têm um comportamento bastante semelhante, contudo para possibilitar uma melhor comparação, analisaram-se alguns pontos da superfície utilizando os modelos empíricos resultantes da metodologia da superfície de resposta. Na Tabela 5.10 estão disponíveis os resultados obtidos pelos modelos empíricos obtidos pelas duas impressoras variando quer a orientação quer a espessura de camada.

Tabela 5.10 - Resultados da comparação das rugosidades nas duas impressoras variando a espessura de camada e a orientação

	Espessura de camada	Orientação	$Rug_{A(Zero)}$	$Rug_{B(Zero)}$	$Rug_{A(One)}$	$Rug_{B(One)}$
1	1,682	1,682	14,481	22,298	5,386	26,619
2	1	1,682	12,099	20,361	5,233	23,874
3	0	1,682	8,606	17,521	5,009	19,850
4	-1	1,682	5,113	14,681	4,786	15,826
5	-1,682	1,682	2,731	12,744	4,633	13,082
6	1,682	1	17,140	22,972	10,935	23,668
7	1	1	14,758	21,035	9,750	20,924
8	0	1	11,265	18,195	8,013	16,900
9	-1	1	7,772	15,355	6,276	12,876
10	-1,682	1	5,390	13,418	5,091	10,132
11	1,682	0	21,039	20,960	19,071	19,342
12	1	0	18,657	19,023	16,373	16,598
13	0	0	15,164	16,183	12,417	12,574
14	-1	0	11,671	13,343	8,461	8,550
15	-1,682	0	9,289	11,406	5,763	5,806
16	1,682	-1	24,938	15,380	27,207	15,016
17	1	-1	22,556	13,443	22,996	12,272
18	0	-1	19,063	10,603	16,821	8,248
19	-1	-1	15,570	7,763	10,646	4,224
20	-1,682	-1	13,188	5,826	6,435	1,480
21	1,682	-1,682	27,597	9,528	32,756	12,066
22	1	-1,682	25,215	7,591	27,513	9,322
23	0	-1,682	21,722	4,751	19,825	5,298
24	-1	-1,682	18,229	1,911	12,136	1,274
25	-1,682	-1,682	15,847	-0,026	6,893	-1,471

Apresentam-se então os gráficos que comparam as rugosidades na face A das duas impressoras, Figura 5.13, e a rugosidade na face B das duas impressoras, Figura 5.15. Estão evidenciados 5 grupos distintos no gráfico, estes referem-se a 5 valores de espessura de camada diferentes para a mesma orientação.

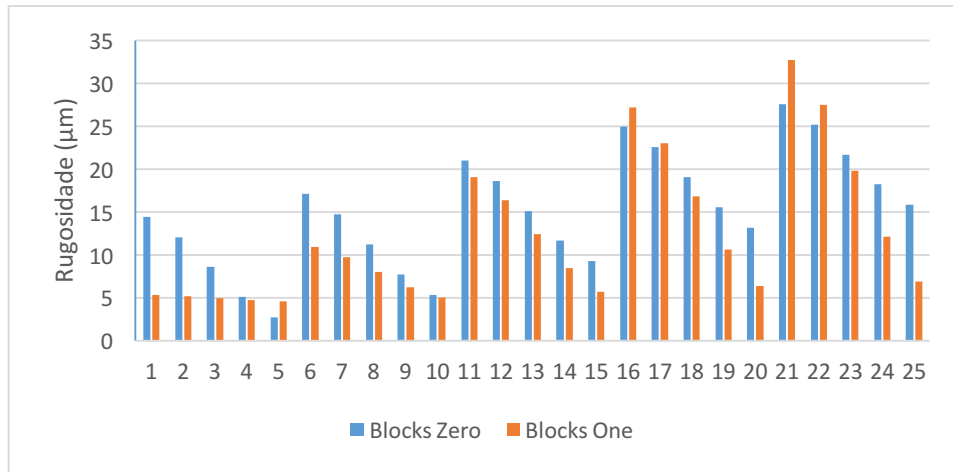


Figura 5.13 - Comparação dos resultados obtidos pelas duas impressoras para a resposta Rugosidade A

Pela análise do gráfico conclui-se que de uma forma geral a Blocks One obtém rugosidades inferiores à Blocks Zero na face A em estudo, tendo apenas obtido rugosidade superiores em 4 dos 25 casos apresentados. Esses 4 casos (16, 17, 21 e 22) são todos eles considerando espessuras de camada relativamente altas juntamente com a posição da face nos níveis -1 e -1.682, correspondendo na realidade a 15 e a -5°, valores onde o efeito de escada, Figura 5.14, é mais intenso. Pode-se então concluir que a Blocks One obteve melhores resultados, contudo o efeito de escada, para espessuras de camada altas, é mais influente nesta impressora que na Blocks Zero, obtendo rugosidades mais altas.

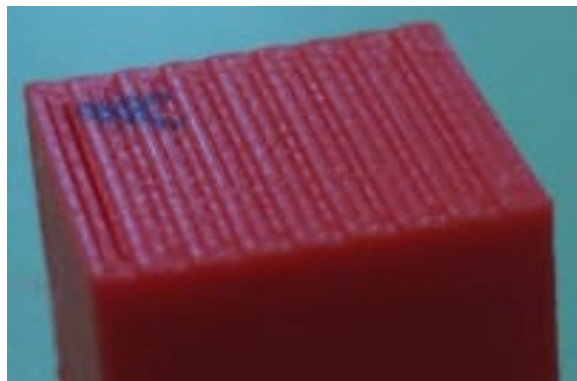


Figura 5.14 - Efeito de escada observado (orientação a -5°)

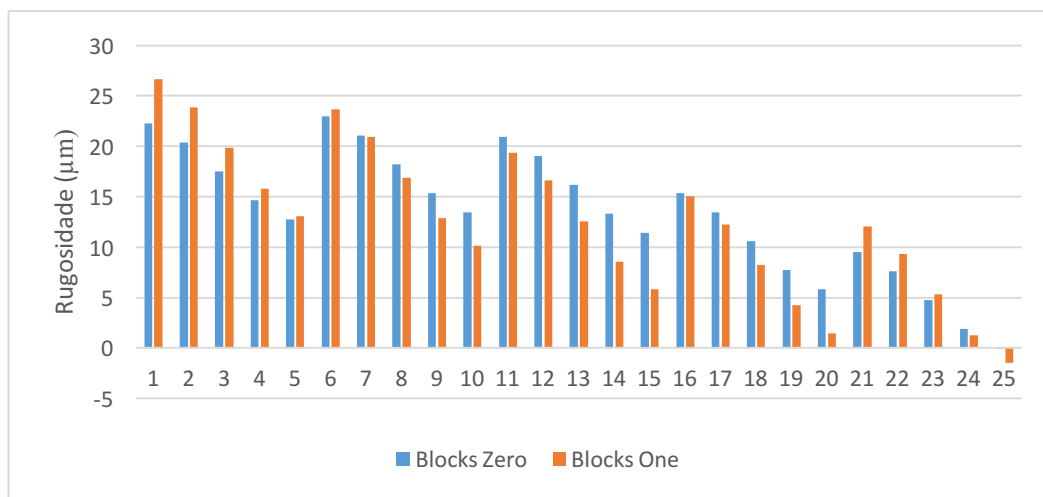


Figura 5.15 - Comparação dos resultados obtidos pelas duas impressoras para a resposta Rugosidade B

Agora analisando os resultados para a face B também se pode afirmar que globalmente a Blocks One obteve melhores resultados, tendo rugosidades inferiores em 16 dos 25 casos. Em 6 desses casos, a impressora Blocks One obteve rugosidades superiores à Blocks Zero, dos quais 5 refletem as rugosidades medidas na face B quando esta sofre uma rotação de 95° e um caso quando sofre uma rotação de 75°. Estas duas posições correspondem ao mesmo caso em que a face A está a -5° e a 15°, respetivamente. Nestes casos, onde o efeito escada é mais evidenciado a Blocks One obteve piores resultados, considerando todas as espessuras de camada e não somente espessuras de camada altas.

Nos últimos casos, 21, 22 e 23, a Blocks One obteve resultados piores também, neste caso a face está numa orientação quase perpendicular à plataforma de impressão.

Observam-se também resultados previstos como negativos na rugosidade na face B da impressora Blocks One. Isto deve-se ao facto de o modelo empírico ter sempre erros associados, representando apenas uma aproximação ao que se passa na realidade.

Para entender como evoluem as rugosidades nas duas faces foi realizado um teste usando os modelos empíricos em que se manteve a espessura no seu valor nominal e foi se variando o valor da orientação. Os resultados estão disponíveis na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados obtidos pelo modelo empírico variando a orientação e mantendo a espessura de camada constante

Espessura de camada	Orientação	$Rug_{A(Zero)}$	$Rug_{B(Zero)}$	$Rug_{A(One)}$	$Rug_{B(One)}$
0	-1,682	21,722	4,751	19,825	5,298
0	-1,6	21,402	5,542	19,463	5,652
0	-1,4	20,623	7,372	18,583	6,518
0	-1,2	19,843	9,059	17,702	7,383
0	-1	19,063	10,603	16,821	8,248
0	-0,8	18,283	12,004	15,940	9,113
0	-0,6	17,503	13,263	15,059	9,978
0	-0,4	16,724	14,379	14,179	10,844
0	-0,2	15,944	15,352	13,298	11,709
0	0	15,164	16,183	12,417	12,574
0	0,2	14,384	16,871	11,536	13,439
0	0,4	13,604	17,416	10,655	14,304
0	0,6	12,825	17,818	9,775	15,170
0	0,8	12,045	18,078	8,894	16,035
0	1	11,265	18,195	8,013	16,900
0	1,2	10,485	18,169	7,132	17,765
0	1,4	9,705	18,001	6,251	18,630
0	1,6	8,926	17,690	5,371	19,496
0	1,682	8,606	17,521	5,009	19,850

Na Figura 5.16 está representada a evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação

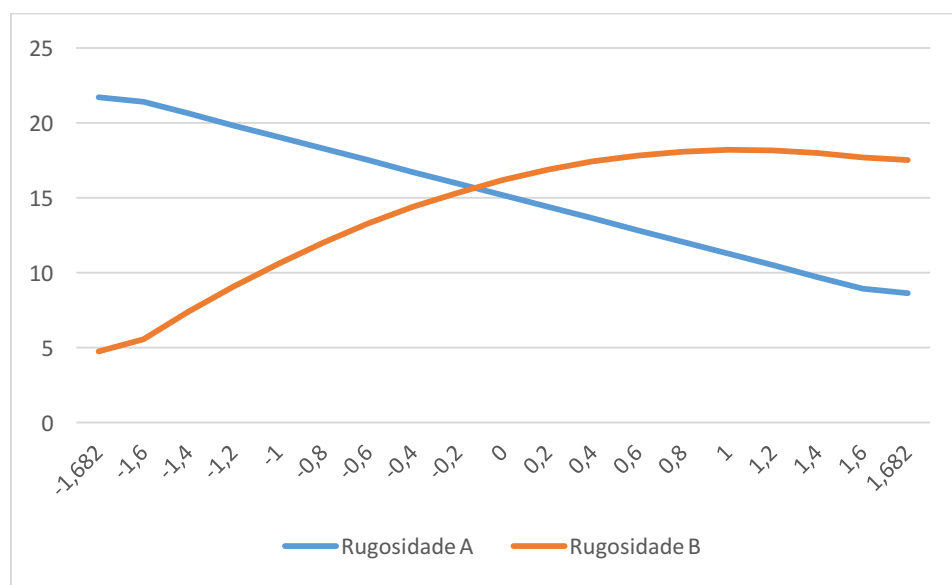


Figura 5.16 - Evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação, mantendo a espessura constante no nível 0 (Impressora: Blocks Zero)

Na Figura 5.17 está ilustrada a evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação.

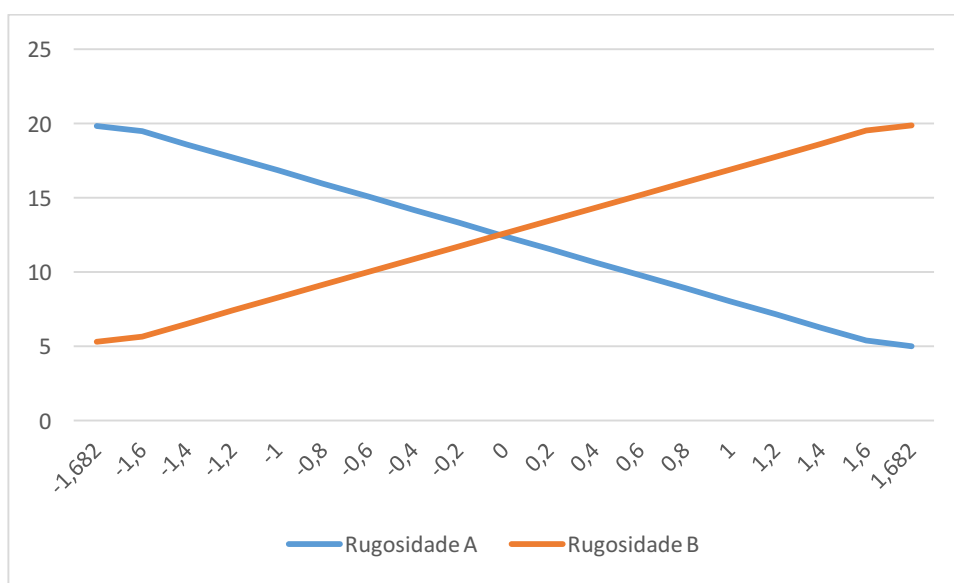


Figura 5.17 - Evolução da Rugosidade A e da Rugosidade B com a orientação, mantendo a espessura constante no nível 0 (Impressora: Blocks One)

Constata-se nos dois gráficos que a rugosidade na face A diminui sempre com a orientação. Pois, no caso em que a orientação é mínima, esta tem uma orientação quase paralela à plataforma de impressão tendo um efeito de escada mais intenso, originando rugosidades elevadas. Já a rugosidade na face B, quando a orientação é mínima obtém os seus valores mínimos uma vez que tem a sua face aproximadamente perpendicular à plataforma de impressão. Outra observação que se deve apontar é o facto das curvas se cruzarem no ponto em que a orientação é 0 (45°).

Teoricamente, quando o cubo sofre uma rotação de 45°, a rugosidade obtida nas faces A e B, Figura 5.18, deveria ser igual uma vez que o cubo é fabricado camada a camada. Para verificar se tal acontece foi realizado um teste, utilizando os modelos empíricos obtidos pela aplicação da Metodologia da Superfície de Resposta, em que se foi variando a espessura de camada, mantendo sempre a orientação no nível 0 (45°).

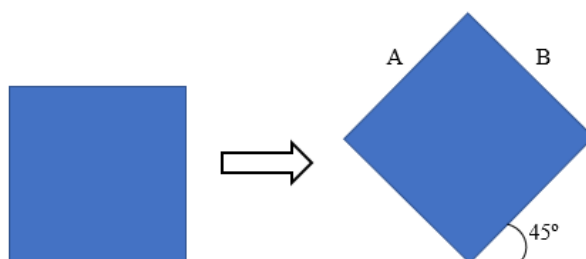


Figura 5.18 - Rotação de 45° do cubo

Os resultados obtidos podem ser consultados Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultados da comparação das rugosidades nas duas impressoras variando a espessura de camada e mantendo a variável orientação sempre no nível zero

Espessura de camada	Orientação	<i>Rug_{A(Zero)}</i>	<i>Rug_{A(Zero)}</i>	<i>Rug_{A(One)}</i>	<i>Rug_{B(One)}</i>
-1,682	0	9,289	11,406	5,763	5,806
-1,6	0	9,575	11,639	6,087	6,136
-1,4	0	10,274	12,207	6,879	6,940
-1,2	0	10,972	12,775	7,670	7,745
-1	0	11,671	13,343	8,461	8,550
-0,8	0	12,370	13,911	9,252	9,355
-0,6	0	13,068	14,479	10,043	10,160
-0,4	0	13,767	15,047	10,835	10,964
-0,2	0	14,465	15,615	11,626	11,769
0	0	15,164	16,183	12,417	12,574
0,2	0	15,863	16,751	13,208	13,379
0,4	0	16,561	17,319	13,999	14,184
0,6	0	17,260	17,887	14,791	14,988
0,8	0	17,958	18,455	15,582	15,793
1	0	18,657	19,023	16,373	16,598
1,2	0	19,356	19,591	17,164	17,403
1,4	0	20,054	20,159	17,955	18,208
1,6	0	20,753	20,727	18,747	19,012
1,682	0	21,039	20,960	19,071	19,342

A fim de compreender melhor os resultados acima dispostos, apresentam-se dois gráficos que representam a evolução das rugosidades nas superfícies A e B com o aumento da espessura de camada mantendo sempre a orientação no nível 0 (45°). A Figura 5.19 contém os valores previstos pelos modelos para a impressora Blocks Zero e a Figura 5.20 contém as previsões de rugosidades para a Blocks One.

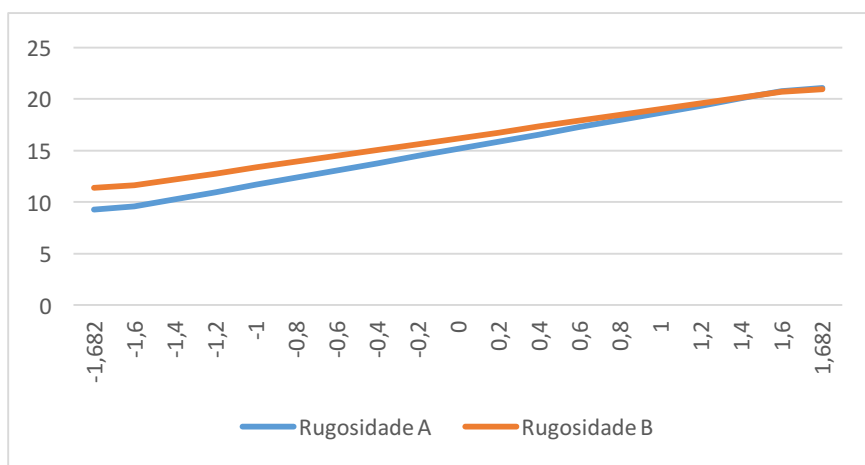


Figura 5.19 - Rugosidades obtidas nas duas faces em estudos mantendo a orientação sempre no nível 0 (45°) e variando o valor da espessura de camada (Impressora: Blocks Zero)

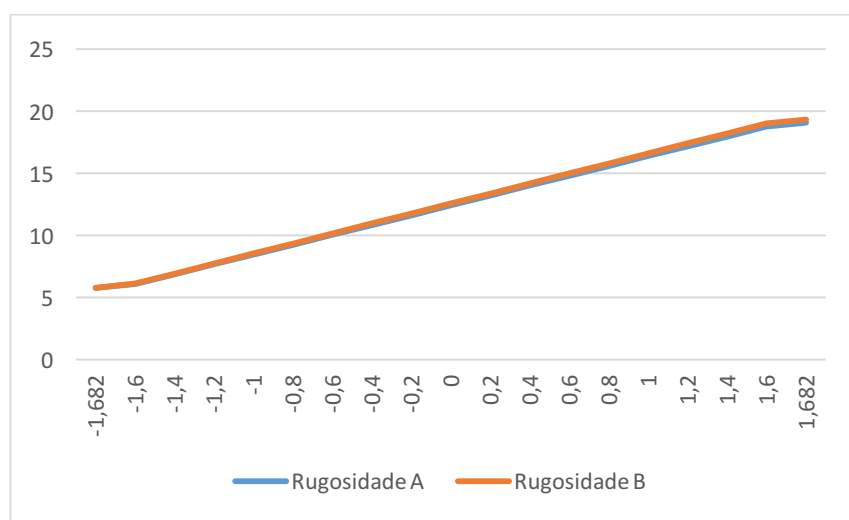


Figura 5.20 - Rugosidades obtidas nas duas faces em estudos mantendo a orientação sempre no nível 0 (45°) e variando o valor da espessura de camada (Impressora: Blocks One)

Comparando os dois gráficos acima é possível observar que a impressora Blocks Zero apresenta uma maior inconsistência entre camadas. Para uma orientação das faces a 45° com a plataforma de impressão era espectável que as rugosidades fossem as mesmas, contudo esta apenas apresenta rugosidades próximas umas das outras para valores elevados de espessura de camada. Já o gráfico para os resultados da Blocks One apresentam duas retas praticamente sobrepostas o que indica que as rugosidades se encontram bastantes próximas uma da outra para qualquer que seja a espessura de camada.

O motivo pelo qual a Blocks One obteve resultados geralmente melhores é o facto de esta ter Core XY, conforme já mencionado, querendo isto dizer que a sua cabeça de extrusão opera no plano

XY que é sempre, em teoria, paralelo à plataforma de impressão. A Blocks Zero tem Core XZ, tendo a extrusora a operar no plano XZ. Isto quer dizer que na Blocks One as camadas são impressas apenas pelo movimento da extrusora enquanto que na Blocks Zero as camadas são impressas através do movimento da cabeça de extrusão simultaneamente com a plataforma de impressão. O facto de o provete estar em movimento durante o seu fabrico causa mais imperfeições do que estando parado.

5.2.2 Estudo dos Desvios Dimensionais

Realizadas as medições aos 29 provetes produzidos em cada impressora foi realizado o tratamento estatísticos dos resultados no programa STATISTICA. Os resultados obtidos bem como a análise residual encontram-se no Anexo D.1.

Seguindo a mesma ordem, serão apresentados primeiro os resultados obtidos na Blocks Zero seguidos dos obtidos na Blocks One.

Blocks Zero

Apresentam-se então as tabelas ANOVA, Tabela 5.13, Tabela 5.14 e Tabela 5.15, retiradas do programa STATISTICA para as respostas: Desvios X, Desvio Y e Desvio Z, respectivamente.

Tabela 5.13 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X (Impressora: Blocks Zero)

ANOVA: Var.:Desvio X; R-sqr=.49445; Adj:0,4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=,1 DV: Desvio X					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,002604	1	0,002604	0,329279	0,575187
Dimensão(Q)	0,040696	1	0,040696	5,145726	0,039651
(2)Espessura de Camada(L)	0,001504	1	0,001504	0,190192	0,669407
Espessura de Camada(Q)	0,007189	1	0,007189	0,909025	0,356546
(3)Velocidade de impressão(L)	0,007004	1	0,007004	0,885629	0,362620
Velocidade de impressão(Q)	0,010793	1	0,010793	1,364733	0,262228
(4)Temperatura(L)	0,010004	1	0,010004	1,264959	0,279629
Temperatura(Q)	0,000218	1	0,000218	0,027511	0,870634
1L by 2L	0,000156	1	0,000156	0,019757	0,890221
1L by 3L	0,000306	1	0,000306	0,038723	0,846826
1L by 4L	0,001806	1	0,001806	0,228388	0,640098
2L by 3L	0,009506	1	0,009506	1,202001	0,291424
2L by 4L	0,000506	1	0,000506	0,064012	0,803941
3L by 4L	0,002256	1	0,002256	0,285287	0,601635
Error	0,110722	14	0,007909		
Total SS	0,219014	28			

Tabela 5.14 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)

ANOVA: Var.:Desvio Y; R-sqr=.49305; Adj:0,4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=,1 DV: Desvio Y					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,016017	1	0,016017	1,207471	0,290372
Dimensão(Q)	0,033938	1	0,033938	2,558532	0,132018
(2)Espessura de Camada(L)	0,005400	1	0,005400	0,407097	0,533744
Espessura de Camada(Q)	0,011808	1	0,011808	0,890208	0,361420
(3)Velocidade de impressão(L)	0,021600	1	0,021600	1,628389	0,222691
Velocidade de impressão(Q)	0,031935	1	0,031935	2,407552	0,143058
(4)Temperatura(L)	0,003267	1	0,003267	0,246269	0,627415
Temperatura(Q)	0,014738	1	0,014738	1,111075	0,309701
1L by 2L	0,025600	1	0,025600	1,929943	0,186466
1L by 3L	0,000025	1	0,000025	0,001885	0,965985
1L by 4L	0,000900	1	0,000900	0,067850	0,798286
2L by 3L	0,000400	1	0,000400	0,030155	0,864624
2L by 4L	0,000025	1	0,000025	0,001885	0,965985
3L by 4L	0,000900	1	0,000900	0,067850	0,798286
Error	0,185705	14	0,013265		
Total SS	0,366317	28			

Tabela 5.15 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)

ANOVA: Var.:Desvio Z; R-sqr=.77303; Adj:0,54606 4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=.01680 DV: Desvio Z					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,016017	1	0,016017	0,95308	0,345504
Dimensão(Q)	0,106552	1	0,106552	6,34042	0,024595
(2)Espessura de Camada(L)	0,220417	1	0,220417	13,11604	0,002777
Espessura de Camada(Q)	0,023873	1	0,023873	1,42059	0,253119
(3)Velocidade de impressão(L)	0,004267	1	0,004267	0,25389	0,622184
Velocidade de impressão(Q)	0,047603	1	0,047603	2,83264	0,114524
(4)Temperatura(L)	0,070417	1	0,070417	4,19019	0,059909
Temperatura(Q)	0,027970	1	0,027970	1,66440	0,217913
1L by 2L	0,000100	1	0,000100	0,00595	0,939604
1L by 3L	0,000625	1	0,000625	0,03719	0,849846
1L by 4L	0,004900	1	0,004900	0,29158	0,597696
2L by 3L	0,270400	1	0,270400	16,09034	0,001287
2L by 4L	0,046225	1	0,046225	2,75065	0,119442
3L by 4L	0,025600	1	0,025600	1,52335	0,237431
Error	0,235272	14	0,016805		
Total SS	1,036579	28			

Pela análise das tabelas acima presentes conclui-se que o Desvio X apenas tem uma variável significativa, a espessura de camada (quadrática). O Desvio Z tem a dimensão (quadrática), a espessura de camada linear e a interação entre a espessura de camada e a velocidade. O Desvio Y não obteve nenhuma variável que se revelasse significativa.

Olhando agora para os coeficientes de correlação, as respostas: Desvio X e Desvio Y, obtiveram coeficientes baixos, ambos 0,49, obtendo ainda coeficientes de correlação ajustados iguais a zero. Olhando para a resposta Desvio Y, nesta não foram obtidas variáveis significativas. Estes resultados estão longe de ser ideais, não se revelando uma boa aproximação à realidade.

As seguintes figuras, Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 representam o gráfico de *Pareto* para o Desvio X, Desvio Y e Desvio Z, respectivamente. Nelas está evidenciada a importância de cada variável e da sua interação com outras variáveis.

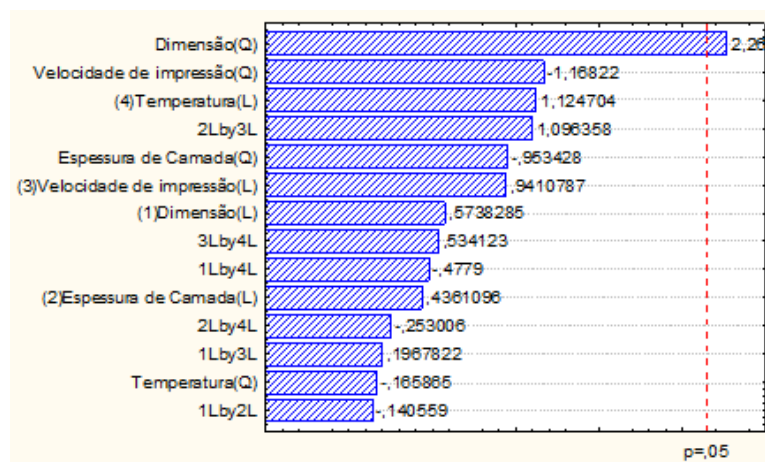


Figura 5.21 - Gráfico de *Pareto* para o Desvio X (Impressora: Blocks Zero)

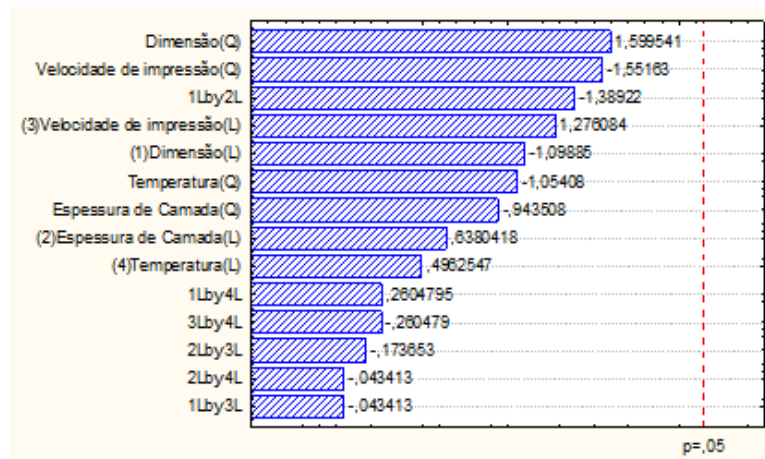


Figura 5.22 - Gráfico de *Pareto* para o Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)

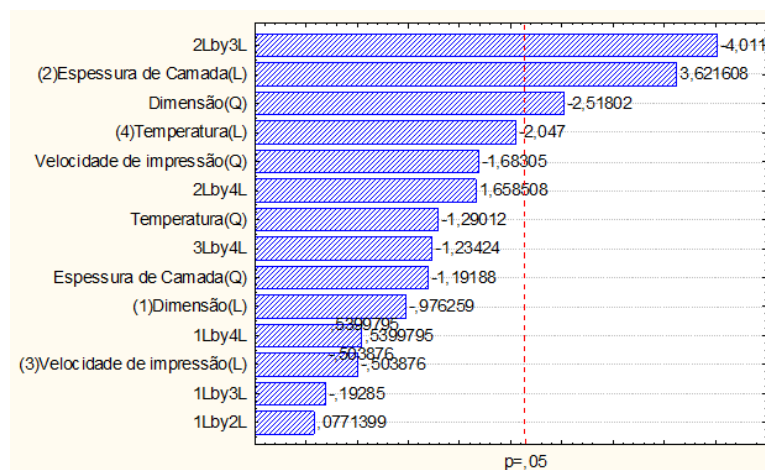


Figura 5.23 - Gráfico de Pareto para o Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)

Apresentam-se agora as superfícies obtidas e no caso em que só se revelou uma variável, apresenta-se a representação do modelo empírico obtido pela regressão.

Desvio X

Na Figura 5.24 está presente uma representação do modelo matemático para prever o Desvio X.

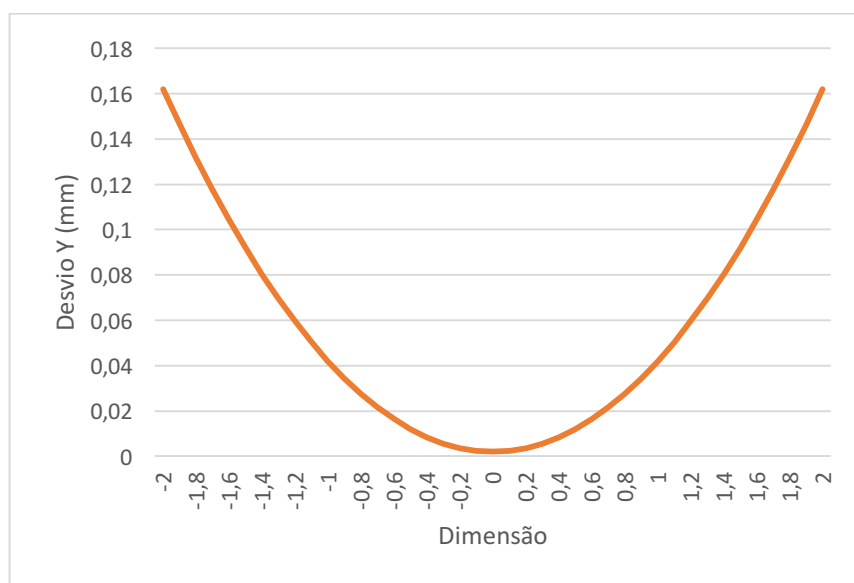


Figura 5.24 - Representação do modelo matemático para prever o Desvio X

O desvio em X apenas teve um fator significativa, a dimensão quadrática. Pela análise do gráfico o desvio X diminui desde o seu valor mínimo até ao seu valor nominal. Depois do valor nominal

volta a aumentar. Contudo, pelos coeficientes de correlação obtidos conclui-se que esta aproximação está longe do ideal.

Desvio Y

No desvio em Y não foram obtidas variáveis significativas não sendo, por esse motivo, apresentadas superfícies de resposta.

Desvio Z

A Figura 5.25 representa a superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da dimensão do provete.

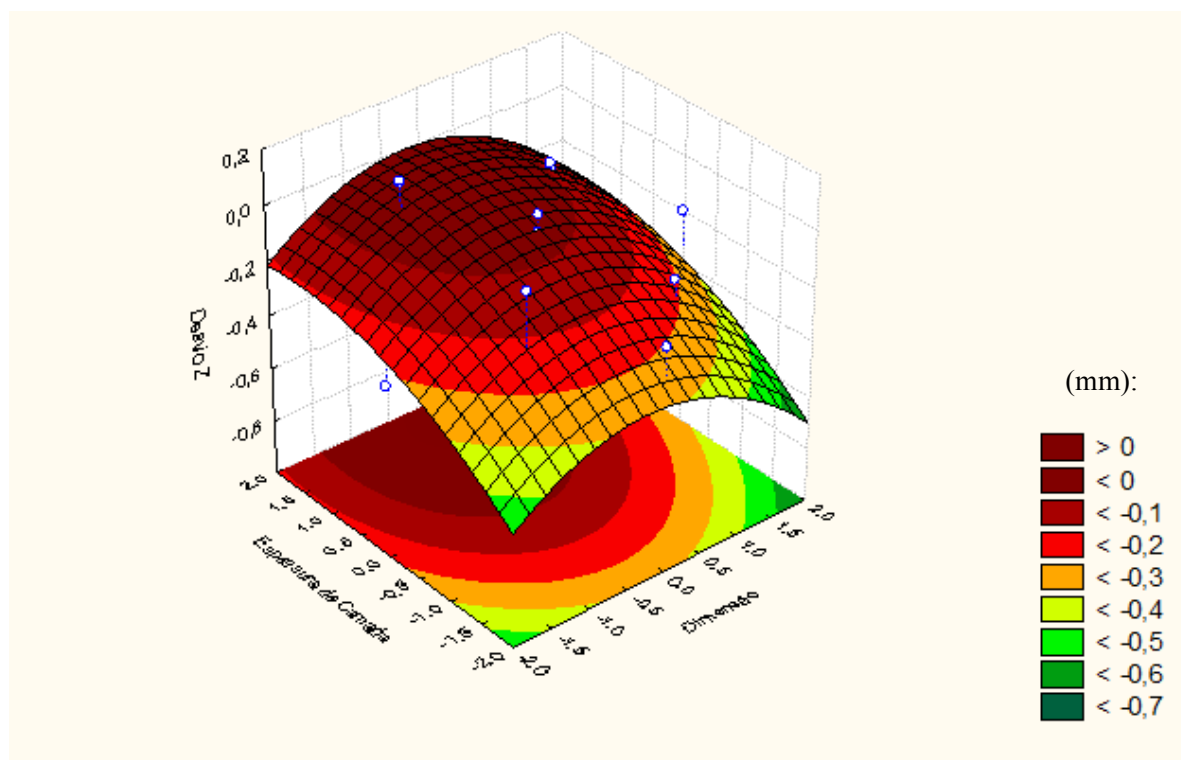


Figura 5.25 - Superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks Zero)

Analisando a superfície é possível concluir que praticamente para qualquer combinação de valores de dimensão e espessura de camada os desvios dimensionais obtidos são negativos. Para espessuras de camada baixas o desvio aumenta bastante, principalmente nos casos em que a dimensão é mínima ou máxima.

Os menores desvios dimensionais só são possíveis para dimensões entre -0.5 e 0.5 (27.5 mm e 42,5 mm, respetivamente), aproximadamente, se forem usadas espessura de camada altas, entre 0.5 e 2 (0.175 mm e 0.25 mm, respetivamente).

A Figura 5.26 representa a superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da velocidade de impressão.

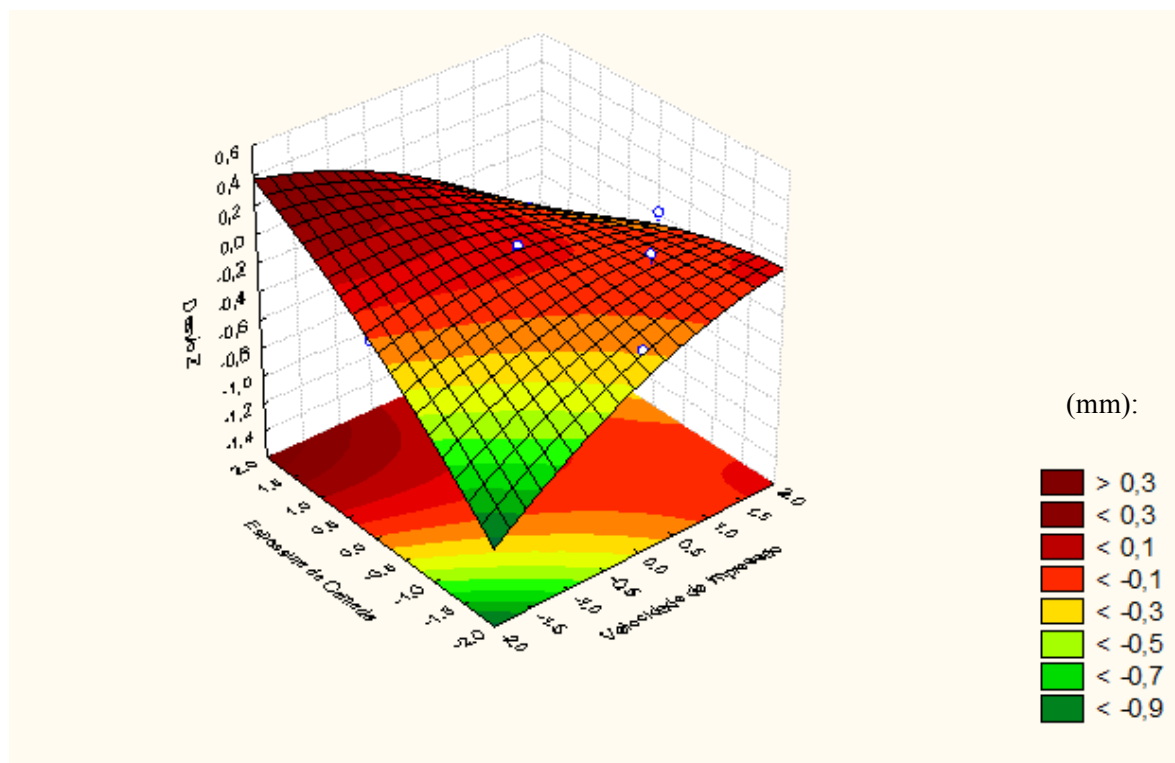


Figura 5.26 - Superfície de resposta para o Desvio Z em função da espessura de camada e da velocidade de impressão (Impressora: Blocks Zero)

Pela análise da figura concluir-se que os maiores desvios dimensionais negativos dão-se quando se junta uma velocidade de impressão mínima com uma espessura de camada mínima. É também observável que para valores máximos de espessura juntamente com valores máximos de velocidade obtêm-se desvios dimensionais relativamente altos, estes também negativos.

Os desvios dimensionais positivos obtêm-se quando se combinam velocidades de impressão muito baixas (-0,5 a -2, correspondendo a 40 mm/s e 10 mm/s, respetivamente) com espessuras de camada elevadas (1 a 2, correspondendo a 0,2 mm e 0,25 mm, respetivamente).

Os desvios dimensionais mais próximos de zero obtêm-se de três formas: conjugando espessuras de camada baixas, entre -1,5 e -2 (0.075 mm e 0.05 mm, respetivamente), com velocidades de impressão máximas, entre 1,6 e 2 (82 mm/s e 90mm/s, respetivamente); conjugando velocidades de impressão entre 0 e 0,4 (50 mm/s e 58mm/s) com espessuras de camada de 0 a 2 (0,15 a 0,25 mm) ou

conjugando espessuras de camada entre 0,4 e 0,6 (entre 0,17 e 0,18 mm) com velocidades de impressão entre -2 e 0,5 (10 mm/s e 60 mm/s, respetivamente).

Apresentam-se então, na Tabela 5.16, os modelos empíricos resultantes da aplicação do RSM usados para estimar as repostas, Desvio X e Desvio Z, na impressora Blocks Zero.

Tabela 5.16 - Modelos matemáticos para prever os desvios em relação à cota nominal (Impressora: Blocks Zero)

$D_{x(ZERO)} = 0.002 + 0.040D^2$	$R^2 = 0.49445$ $R_A^2 = 0$
$D_{z(ZERO)} = -0.072 - 0.064D^2 + 0.096E_c - 0.130E_c \times v$	$R^2 = 0.77303$ $R_A^2 = 0.54606$

Blocks One

A Tabela 5.17, Tabela 5.18 e Tabela 5.19 correspondem as tabelas ANOVA para as respostas Desvio X, Desvio Y e Desvio Z, respectivamente. Os resultados obtidos no estudo dos desvios dimensionais bem como a análise residual estão disponíveis no Anexo D.2

Tabela 5.17 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X (Impressora: Blocks One)

ANOVA: Var.:Desvio X; R-sqr=.91922; Adj.:83843 4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=.0015; DV: Desvio X					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,152004	1	0,152004	98,69637	0,000000
Dimensão(Q)	0,006117	1	0,006117	3,97162	0,066139
(2)Espessura de Camada(L)	0,042504	1	0,042504	27,59797	0,000122
Espessura de Camada(Q)	0,008271	1	0,008271	5,37025	0,036138
(3)Velocidade de Impressão(L)	0,007004	1	0,007004	4,54781	0,051150
Velocidade de Impressão(Q)	0,001829	1	0,001829	1,18753	0,294232
(4)Temperatura de Extrusão(L)	0,005704	1	0,005704	3,70372	0,074859
Temperatura de Extrusão(Q)	0,003494	1	0,003494	2,26852	0,154253
1L by 2L	0,015006	1	0,015006	9,74356	0,007505
1L by 3L	0,000306	1	0,000306	0,19885	0,662471
1L by 4L	0,000056	1	0,000056	0,03652	0,851183
2L by 3L	0,002756	1	0,002756	1,78963	0,202297
2L by 4L	0,000506	1	0,000506	0,32871	0,575515
3L by 4L	0,000306	1	0,000306	0,19885	0,662471
Error	0,021562	14	0,001540		
Total SS	0,266903	28			

Tabela 5.18 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y (Impressora: Blocks One)

ANOVA: Var.:Desvio Y; R-sqr=.93442; Adj.:86884 4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=.0009; DV: Desvio Y					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,066150	1	0,066150	72,11681	0,000001
Dimensão(Q)	0,003659	1	0,003659	3,98881	0,065622
(2)Espessura de Camada(L)	0,081667	1	0,081667	89,03310	0,000000
Espessura de Camada(Q)	0,006334	1	0,006334	6,90584	0,019868
(3)Velocidade de Impressão(L)	0,004267	1	0,004267	4,65152	0,048899
Velocidade de Impressão(Q)	0,000010	1	0,000010	0,1105	0,917775
(4)Temperatura de Extrusão(L)	0,000600	1	0,000600	0,65412	0,432173
Temperatura de Extrusão(Q)	0,000010	1	0,000010	0,1105	0,917775
1L by 2L	0,016900	1	0,016900	18,42440	0,000744
1L by 3L	0,000025	1	0,000025	0,02726	0,871232
1L by 4L	0,003025	1	0,003025	3,29786	0,090841
2L by 3L	0,000025	1	0,000025	0,02726	0,871232
2L by 4L	0,000225	1	0,000225	0,24530	0,628090
3L by 4L	0,000400	1	0,000400	0,43608	0,519738
Error	0,012842	14	0,000917		
Total SS	0,195814	28			

Tabela 5.19 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z (Impressora: Blocks One)

ANOVA: Var.:Desvio Z; R-sqr=.51441; Adj.:02882 4 factors, 1 Blocks, 29 Runs; MS Residual=.01401 DV: Desvio Z					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Dimensão(L)	0,012604	1	0,012604	0,896160	0,359868
Dimensão(Q)	0,000550	1	0,000550	0,039106	0,846081
(2)Espessura de Camada(L)	0,119004	1	0,119004	8,461229	0,011441
Espessura de Camada(Q)	0,024700	1	0,024700	1,756178	0,206324
(3)Velocidade de Impressão(L)	0,004537	1	0,004537	0,322618	0,579035
Velocidade de Impressão(Q)	0,015127	1	0,015127	1,075537	0,317280
(4)Temperatura de Extrusão(L)	0,000338	1	0,000338	0,023996	0,879105
Temperatura de Extrusão(Q)	0,012677	1	0,012677	0,901341	0,358524
1L by 2L	0,000156	1	0,000156	0,011109	0,917553
1L by 3L	0,000056	1	0,000056	0,003999	0,950469
1L by 4L	0,000306	1	0,000306	0,021774	0,884793
2L by 3L	0,007656	1	0,007656	0,544361	0,472817
2L by 4L	0,001406	1	0,001406	0,099985	0,756513
3L by 4L	0,001406	1	0,001406	0,099985	0,756513
Error	0,196905	14	0,014065		
Total SS	0,405497	28			

Observando as tabelas acima presentes é possível concluir que o Desvio X teve como variáveis influentes a dimensão (linear), a espessura de camada (linear e quadrática) e a interação entre a dimensão do provete e a espessura de camada. O Desvio Y obteve as mesmas variáveis significativas que o Desvio X e a velocidade de impressão (linear). Por último, o Desvio Z apenas tem a variável espessura de camada linear como significativa.

Na Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 estão representados os gráficos de *Pareto* para as respostas: Desvio X, Desvio Y e Desvio Z, respectivamente. Neles está evidenciada a importância de cada variável e da sua interação com outras variáveis para com a resposta em estudo.

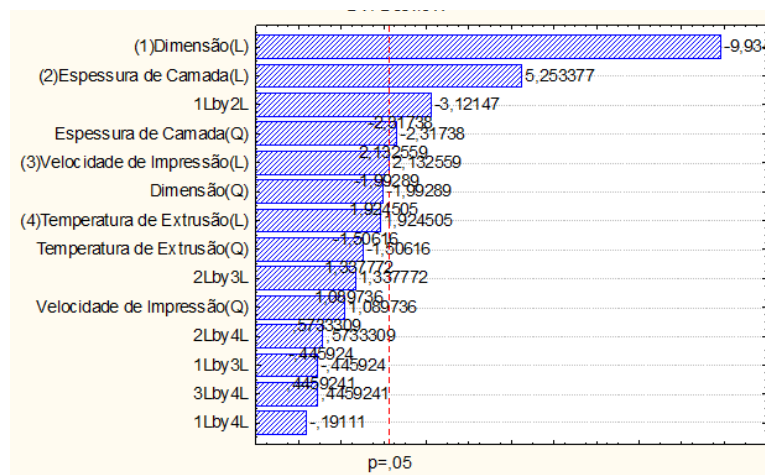


Figura 5.27 - Gráfico de Pareto para o Desvio X (Impressora: Blocks One)

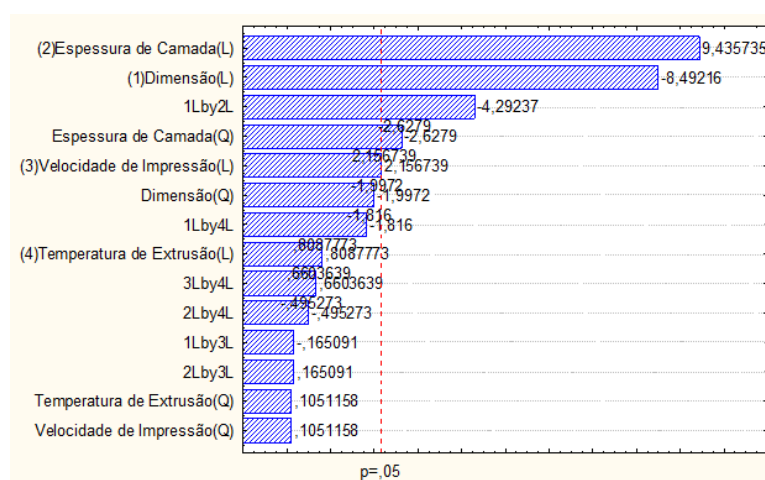


Figura 5.28 - Gráfico de Pareto para o Desvio Y (Impressora: Blocks One)

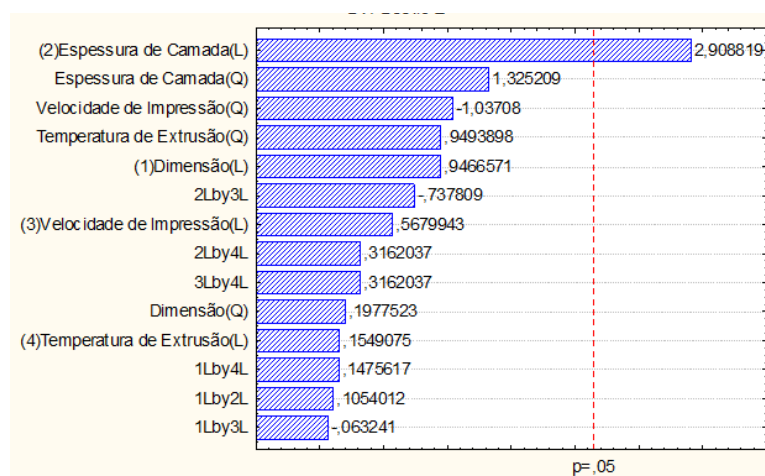


Figura 5.29 - Gráfico de Pareto para o Desvio Z (Impressora: Blocks One)

Apresentam-se agora as superfícies de resposta para os desvios dimensionais na impressora Blocks Zero.

Desvio X

A Figura 5.30 representa a superfície de resposta para o Desvio X em função da espessura de camada e da dimensão do provete.

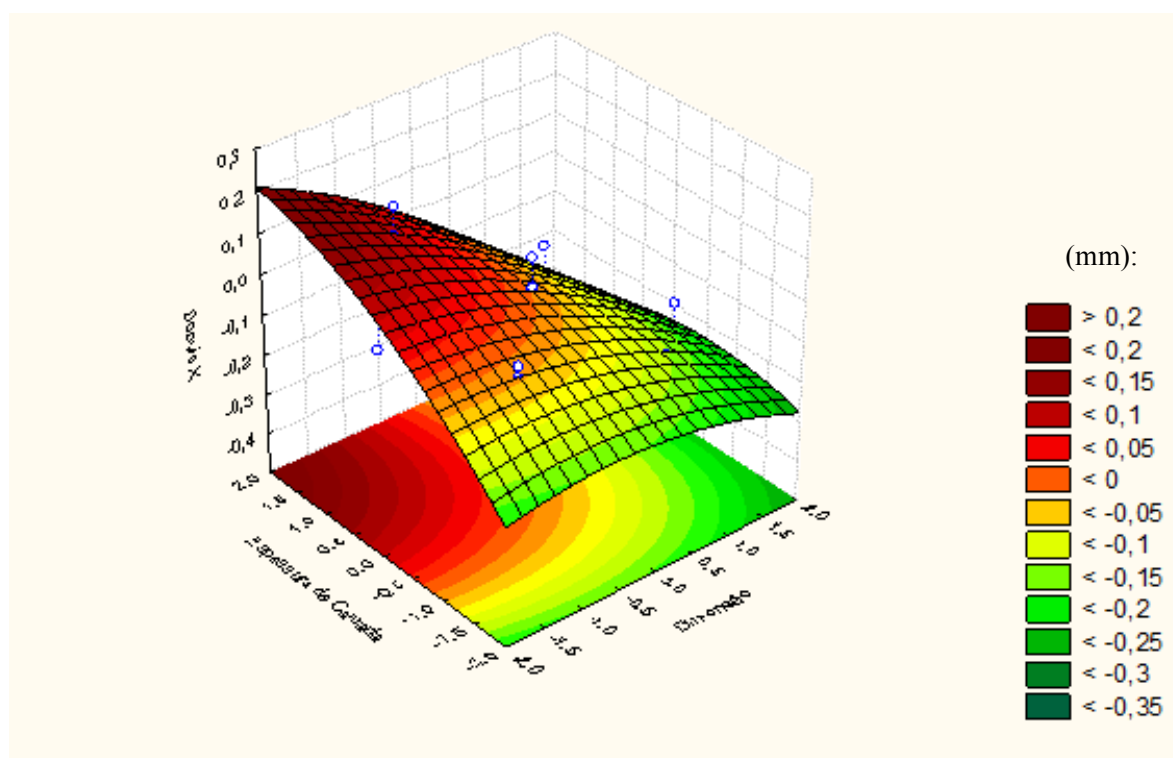


Figura 5.30 - Superfície de resposta para o Desvio X em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks One)

Analisando a superfície acima, é possível concluir que apenas para dimensões de -2 a 0 (5 e 35 mm respetivamente) é que é possível obter desvios dimensionais próximos de zero. Sendo que para dimensões entre -0,3 e 0 (30 e 35mm, respetivamente) é possível obter desvios próximos de zero para qualquer valor de espessura de camada entre 0 e 2 (0,15 e 0,25 mm, respetivamente). Para dimensões entre -2 e -0,3 (5 e 30 mm, aproximadamente) os desvios dimensionais próximos de zero obtêm-se usando valores de espessura de camada entre -0,6 e 0 (0,12 e 0,15mm).

Outra observação a fazer é o facto de se obterem sempre desvios dimensionais inferiores a zero para peças produzidas com dimensões superiores a 0 (35 mm). Já para dimensões inferiores a zero (35

mm) é possível obter desvios dimensionais negativos e positivos sendo que os desvios positivos se obtêm quando se utilizam espessura de camada altas e os negativos quando se utilizam espessuras de camada baixas.

Desvio em Y

A superfície presente na Figura 5.31, representa a superfície de resposta para o Desvio Y em função das variáveis: espessura de camada e dimensão.

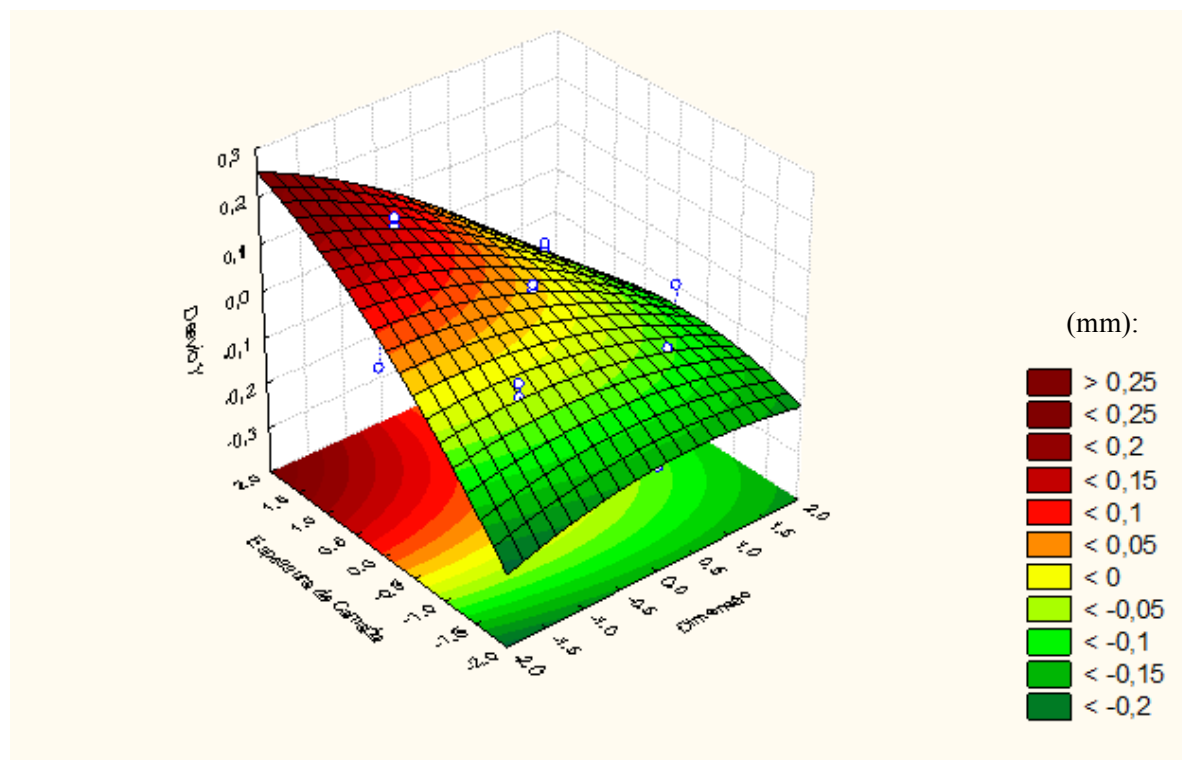


Figura 5.31 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função da espessura de camada e da dimensão (Impressora: Blocks One)

Observando a superfície constata-se que os maiores desvios dimensionais positivos surgem quando se tem a dimensão mínima juntamente com a espessura de camada máxima. Já os maiores desvios dimensionais negativos obtêm-se em dois casos: quando a dimensão é máxima e a espessura de camada é máxima ou quando a dimensão é mínima e a espessura de camada é mínima.

Para dimensões acima de 0,5 (42,5 mm) a superfície prevê sempre desvios dimensionais abaixo da cota nominal para qualquer que seja a combinação de valores entre dimensão e espessura de camada. No entanto, para dimensões inferiores a 0,5 é possível obter desvios dimensionais próximos de zero. Para dimensões de -2 a 0 (5 a 35 mm, respetivamente) usando uma espessura de aproximadamente -0,5

(0,085 mm). Quando se têm dimensões entre a 0 e 0,5 (35 a 42,5 mm) é necessário aumentar significativamente a espessura de camada para que se obtenha o menor desvio possível.

A Figura 5.32 representa a superfície de resposta para o Desvio Y em função da velocidade de impressão e da dimensão.

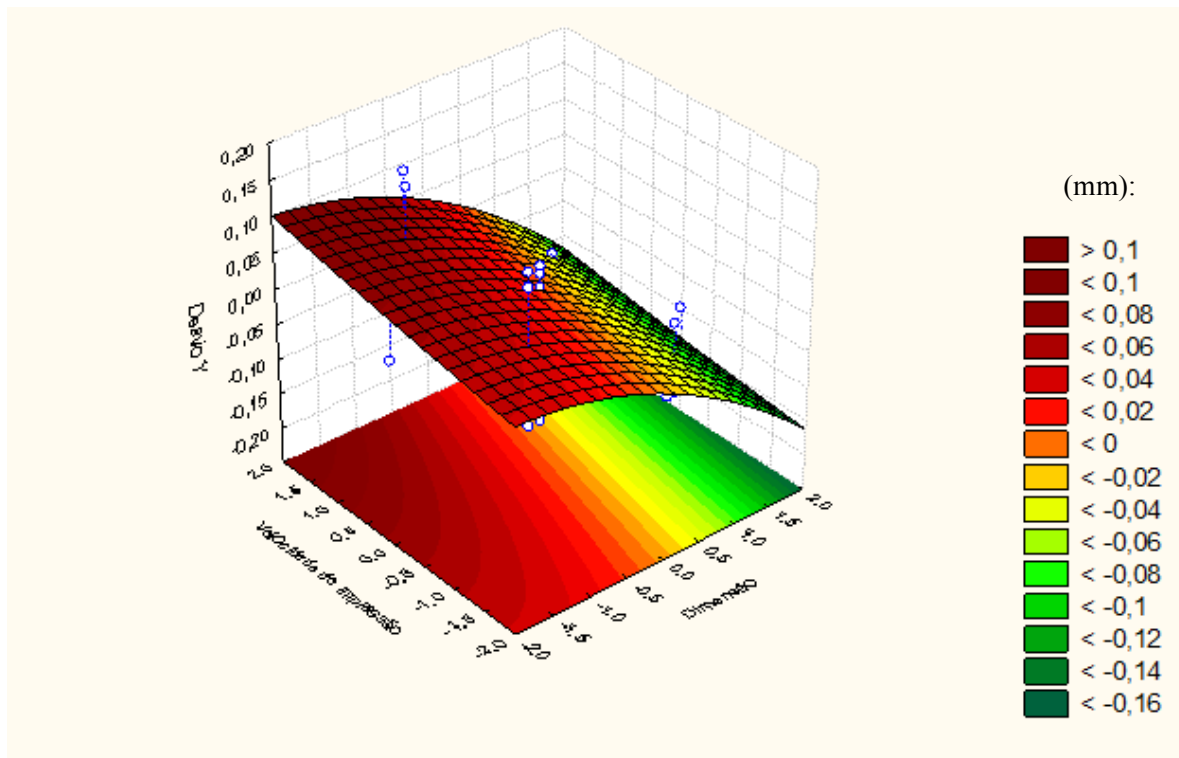


Figura 5.32 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função da dimensão e da velocidade de impressão (Impressora: Blocks One)

Observando a superfície acima é possível observar que, para dimensões de 1 a 2 (50 a 65mm) os desvios dimensionais são sempre negativos. Para dimensões próximas de 0 (35 mm) e até 1 é possível obter desvios dimensionais próximos de zero sendo necessário ir aumentando a velocidade de impressão à medida que se aumenta a dimensão.

Os maiores desvios dimensionais negativos são obtidos quando a dimensão máxima e os maiores desvios positivos são obtidos quando a dimensão é mínima e a velocidade de impressão é máxima.

A Figura 5.33 representa a superfície de resposta para o Desvio Y em função da velocidade de impressão e da espessura de camada.

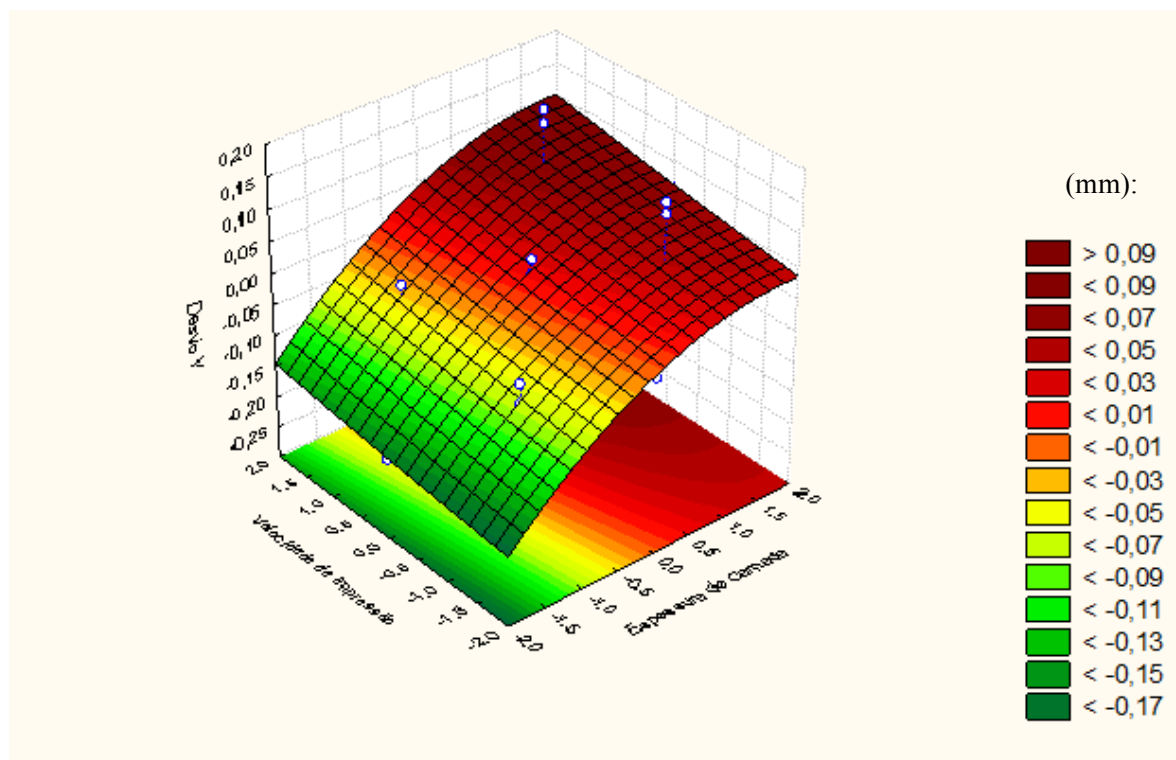


Figura 5.33 - Superfície de resposta para o Desvio Y em função da velocidade de impressão e da espessura de camada (Impressora: Blocks One)

Analisando agora a superfície acima observa-se que usando a velocidade mínima juntamente com a espessura de camada mínima obtêm-se os maiores desvios dimensionais (negativos). Por sua vez, os maiores desvios dimensionais positivos surgem quando se utiliza a espessuras de camada máxima com a velocidade máxima. Os menores desvios surgem quando se usam espessuras de camada entre 0,5 e -0,5 (0,175 e 0,125 mm, respetivamente) sendo que, para menores espessuras de camada, devem ser usadas velocidades mais elevadas e para menores espessuras de camada devem ser utilizadas velocidades mais baixas.

Desvio em Z

A Figura 5.34 é uma representação do modelo matemático usado na previsão do Desvio Z.

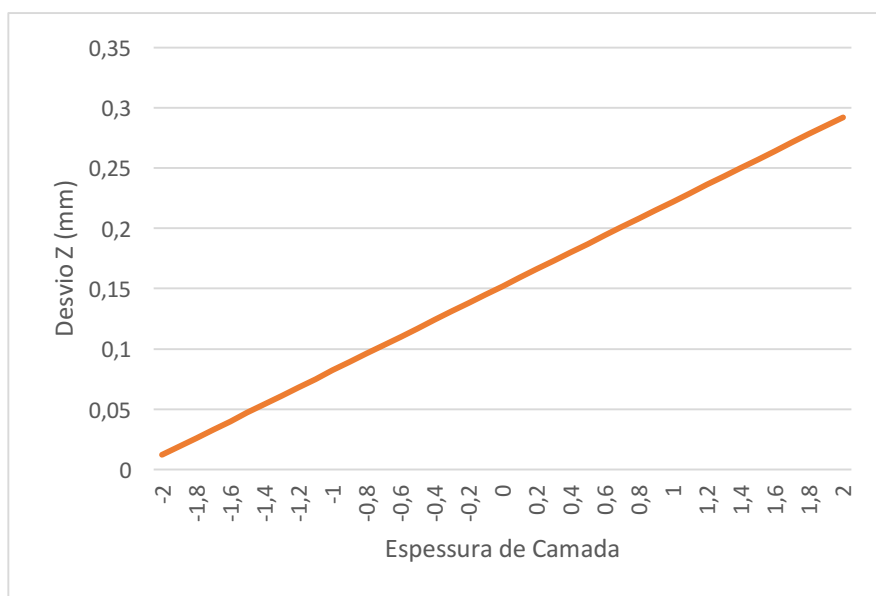


Figura 5.34 - Representação do modelo matemático para prever o Desvio Z

Uma vez que só há um fator significativa e este é linear, o desvio em Z é definido pela reta acima descrita. É possível observar que à medida que a espessura de camada aumenta o desvio também aumenta. Pelo que para se obterem os menores desvios em relação à cota nominal deve ser usada a espessura de camada no seu valor mínimo. Contudo, este tem um coeficiente de correlação ajustado bastante próximo de zero, significando que não representa uma aproximação fidedigna.

A Tabela 5.20 contém os modelos empíricos resultantes da aplicação do RSM usados para estimar as repostas, Desvio X, Desvio Y e Desvio Z, na impressora Blocks One.

Tabela 5.20 - Modelos matemáticos para prever os desvios em relação à cota nominal (Impressora: Blocks One)

$D_{x(ONE)} = -0.024 - 0.079D + 0.042E_c - 0.018E_c^2 - 0.031D \times E_c$	$R^2 = 0.91922$ $R_A^2 = 0.83843$
$D_{y(ONE)} = 0.01 - 0.053D + 0.058E_c - 0.016E_c^2 + 0.013v - 0.033D \times E_c$	$R^2 = 0.93442$ $R_A^2 = 0.86884$
$D_{z(ONE)} = 0.152 + 0.070E_c$	$R^2 = 0.51441$ $R_A^2 = 0.02882$

Comparação dos resultados obtidos nas duas impressoras

Tendo em conta os coeficientes de correlação obtidos nos modelos empíricos para as respostas: Desvio X e Desvio Y nas impressora Blocks Zero e para a resposta Desvio Z na impressora Blocks One, nenhuma comparação entre as impressoras neste estudo será feita, uma vez que os modelos obtidos não representam uma boa aproximação daquilo que se passa na realidade. Pelo que, qualquer comparação só iria trazer conclusões erradas.

6.1 Conclusões

6.1.1 Estudos do acabamento superficial

As rugosidades mais elevadas surgem sempre quando as faces que se estão a medir estão aproximadamente paralelas ao plano da plataforma de impressão. Este ponto é onde o efeito de escada é mais visível e obtêm-se degraus mais profundos, Figura 6.1. Já a espessura de camada é diretamente proporcional com o valor da rugosidade obtida, uma maior espessura equivale sempre a uma maior rugosidade obtida. Pode-se dizer então que este efeito de escada é só preponderante nas últimas camadas quando a peça tem pequenas inclinações.

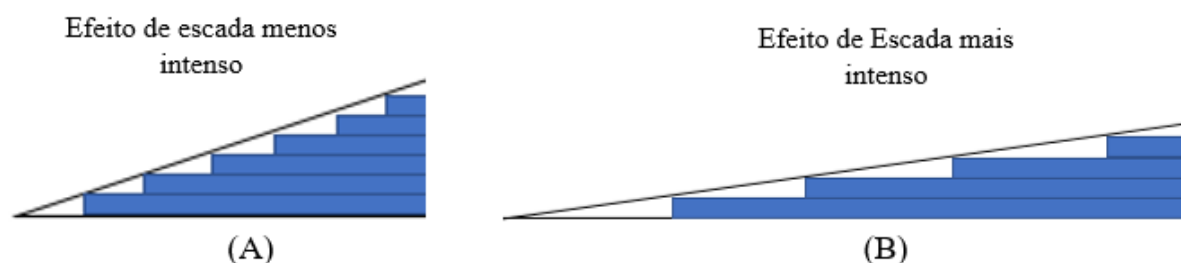


Figura 6.1 - Evolução do efeito de escada

Comparando agora as duas impressoras, o primeiro ponto a assinalar é o facto que no caso em que a orientação está no seu valor nominal (45°) seria expectável que a rugosidade medida nas duas faces, A e B, fosse a mesma. Contudo, na impressora Blocks Zero, isto apenas se verificou quando se utilizam espessuras de camada altas enquanto que na Blocks One este facto verificou-se para qualquer que seja o valor de espessura de camada. Isto deve-se ao facto da impressora Blocks One ser Core XY tendo a extrusora a trabalhar no plano paralelo às camadas enquanto que a impressora Blocks Zero é Core XZ imprimindo as camadas sincronizando o movimento da mesa com o da extrusora, tendo a peça que esta a ser fabricado em movimento durante todo o processo de fabrico.

Relativamente ao caso em que se compararam diretamente os modelos empíricos obtidos para mesma resposta nas duas impressoras, a Blocks One obteve melhores resultados que a Blocks Zero. Tendo apenas obtido resultados piores que a Blocks Zero para pequenas inclinações das faces para com o plano extrusão (situação em que o efeito escada é mais intenso) juntamente com espessuras de camada elevadas. No entanto, há que ter em conta que o método de comparação foi usar os modelos empíricos obtidos pela aplicação do RSM e que os coeficientes de correlação obtidos indicam que os modelos obtidos não representam um modelo ideal podendo indicar que terão sido deixadas de fora variáveis que influenciassem as respostas em estudo.

Contudo, há que apontar o seguinte:

Numa fase inicial foi idealizado que as orientações de 0° e 90° deveriam estar dentro do domínio da experiência, estabelecendo-se um domínio para esta variável entre -5° e 95° . Contudo, numa fase final, verificou-se que essa não foi a melhor solução uma vez que o ponto em que as faces têm uma orientação igual a 0° ou 90° têm um comportamento bastante específico. Uma melhor aproximação deveria ter sido considerado como domínio dessa variável $]0^\circ, 90^\circ [$, excluindo assim este caso específico do domínio da experiência.

Para entender melhor o que foi referido acima apresenta-se a Figura 6.2., onde está exemplificada a evolução da rugosidade na face B em função do ângulo que esta face tem com a mesa de impressão (este ângulo não tem relação nenhuma com as orientações estudadas na dissertação, serve apenas para facilitar a interpretação do que se deveria passar no intervalo estudado).

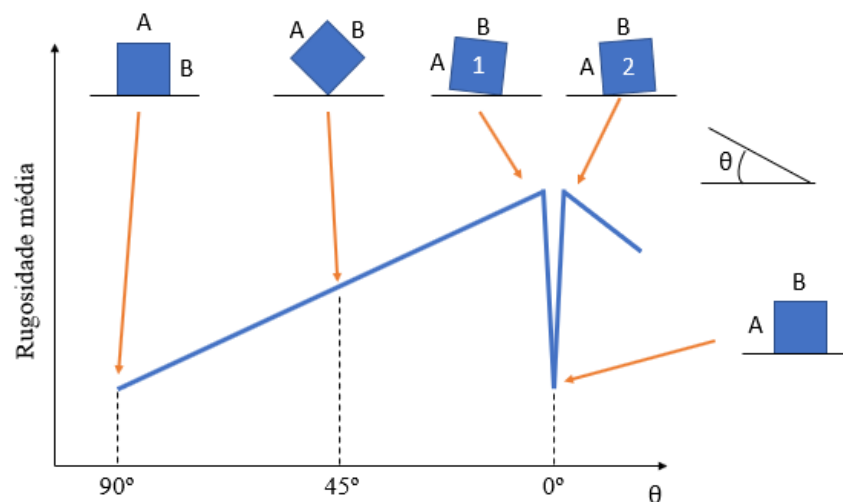


Figura 6.2 - Evolução da rugosidade média na face B da peça em função do ângulo que a face faz com a plataforma de extrusão

No caso em que a face está paralela à plataforma de impressão (0°) as rugosidades obtidas são baixas, conforme se observou na experiência de *screening*.

Pelo que ficou demonstrado, os efeitos de escada são mais visíveis para pequenas inclinações entre a face e a plataforma de impressão e é nesses pontos em que a rugosidade é maior. Olhando para os cubos numerados na Figura 6.2, o cubo 1 tem um ângulo de inclinação positivo próximo de 0° e o cubo 2 tem um ângulo negativo próximo de 0° . Ambos os cubos, 1 e 2, têm um efeito de escada intenso que origina rugosidades elevadas, pelo que se o domínio da experiência tivesse sido entre 0° e 90° (não incluindo estes valores) o comportamento das superfícies ia ser idêntico, no entanto, os modelos matemáticos obtidos apresentariam valores um pouco diferentes.

6.1.2 Estudos dos desvios dimensionais

É necessário referir que a plataforma de impressão teve de ser nivelada de forma regular para garantir uma boa adesão dos provetes, este nivelamento é sempre feito pelo operador da máquina. Não sendo possível garantir que o nivelamento foi sempre igual, este eixo (Z) é possivelmente o mais passível de ter erros devido a fatores externos.

O facto de se terem obtidos coeficientes de correlação muito baixos ou mesmo igual a zero para o Desvio X e Desvio Y da impressora Blocks Zero e para o Desvio Z da impressora Blocks One indica que o modelo obtido está bastante longe do ideal, não representando uma aproximação daquilo que se passa na realidade. Posto isto, qualquer comparação feita não seria fidedigna, uma vez que os modelos obtidos para os desvios dimensionais não representam uma aproximação da realidade. Como tal, esta comparação foi deixada de lado.

Contudo existem algumas observações que devem ser feitas.

No que toca ao eixo Z das impressoras estas têm um comportamento bastante diferente uma da outra. A Blocks Zero obtém em praticamente todos os casos provetes com dimensões menores que a cota nominal, enquanto que Blocks One, pelo contrário, tem na generalidade dos casos provetes com dimensões acima da cota nominal.

No Desvio Z da impressora Blocks Zero, verificou-se uma relação entre a espessura de camada e a velocidade de impressão. Para obter os menores desvios dimensionais deve-se seguir uma razão: ao aumentar a velocidade de impressão deve-se diminuir a espessura de camada ou vice-versa. O aumento de um deles deve ser compensado com uma diminuição no outro para que se possam obter os menores desvios dimensionais possíveis.

As respostas: Desvio X e Desvio Y da impressora Blocks One obtiveram boas aproximações.

O comportamento dos desvios dimensionais em X é bastante semelhante ao comportamento dos desvios dimensionais em Y, derivado, mais uma vez, do facto dos mesmos pertencerem ao plano da extrusora. (Core XY)

Olhando ainda para estes dois eixos concluiu-se que para grandes dimensões há sempre tendência obter desvios dimensionais negativos, obtendo sempre provetes com dimensões abaixo da cota nominal. Já para dimensões menores é possível obter desvios dimensionais positivos ou negativos para dada combinação de valores dos restantes fatores presentes no modelo empírico.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Para o acabamento superficial propõem-se:

- o estudo do *ironing* que consiste em “passar a ferro” a última camada impressa com a extrusora quente, extrudindo quantidades ínfimas material, alisando assim esta última camada;
- Realizar impressões usando *nozzles* com diâmetros diferentes vendo qual é a relação do diâmetro do *nozzle* com a rugosidade obtida;
- Procurar estudar a possibilidade de criar uma equação teórica para o cálculo da rugosidade, semelhantes às existentes para maquinagem.

Para o estudo dimensional propõem-se:

- Estudar a influência de parâmetros de impressão mais específicos, tais como: número de contornos, espaçamento entre filamentos de contorno, ângulo de preenchimento;
- Estabelecer um intervalo de tolerâncias possíveis de obter nas impressoras.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Lipson e M. Kurman, *Fabricated: The new world of 3D Printing*. John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [2] K. Ulrich e S. Eppinger, *Product Design and Development*, 5th Edition. .
- [3] ASTM International, «F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies», *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 10–12, 2013.
- [4] T. Grimm, «3D printer shoot out». 2006. Design News Magazine
- [5] T. Grimm, «Printed prototypes», n. April, p. 2003, 2003. Industrial Technology Magazine
- [6] K. V. Wong e A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing», *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [7] B. Redwood, F. Schöffner, e B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.
- [8] I. Gibson, D. W. Rosen, e B. Stucker, «Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing», *Media*, n. 3, pp. 193–198, 2010.
- [9] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, e D. Hui, «3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective», *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017.
- [10] D. T. P. and C. Ji, «Design for stereolithography», *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 2000.
- [11] L. K. Takagaki, «IMPRESSÃO 3D: A tecnologia do momento», 2013. Universidade de São Paulo
- [12] B. C. Gross, J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen, e D. M. Spence, «Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences», *Anal. Chem.*, vol. 86, n. 7, pp. 3240–3253, 2014.
- [13] «3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP | Formlabs». [Em linha]. Disponível em: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>. [Acedido: 05-Fev-

- 2018].
- [14] A. Graves, «Stereolithography vs. PolyJet: Photopolymer 3D Printing Materials & Applications», *R&D Mag.*, 2016.
 - [15] «The Difference Between FDM and PolyJet Technology In 3D Printing». [Em linha]. Disponível em: <http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/>. [Acedido: 07-Fev-2018].
 - [16] «LOM | 3D Printers Australia». [Em linha]. Disponível em: <http://www.3d-printers.com.au/technologies/lom/>. [Acedido: 06-Fev-2018].
 - [17] W. Gao *et al.*, «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering», *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 69, pp. 65–89, 2015.
 - [18] K. Karunakaran, A. Bernard, S. Suryakumar, L. Dembinski, e G. Tailandier, «Rapid manufacturing of metallic objects», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, n. 4, p. 2012, 2012.
 - [19] A. J. F. Mourão, «Introdução à Engenharia Simultânea e ao Projecto para Fabrico e Montagem», 1999 Faculdade de Ciências de Tecnologia - UNL
 - [20] R. Bakerjian, «Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Vol. VI – Design for Manufacturability», *Soc. Manuf. Eng.*, vol. VI, p. 1992, 1992.
 - [21] V. Philippe, «Introducing MCAE: Expert Tools for Engineering», *Comput. Mech. Eng.*, n. December, p. 1987, 1987.
 - [22] C. K. Chua e K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*, 4th Ed. Singapore: World Scientific, 2014.
 - [23] C. Fonda, E. Canessa, e Z. Zennaro, *Low-Cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development*. ICTP, 2013.
 - [24] S. Zhang, «Location Analysis of 3D Printer Manufacturing Industry», n. May, pp. 1–61, 2014.
 - [25] T. Gornet, «History of Additive Manufacturing», p. 1, 2004.
 - [26] Wohlers *et al.*, *Wohlers Report 2018*, March 20. 2018.
 - [27] M. Szilvsi-Nagy e G. Mátyási, «Analysis of STL files», *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 38, n. 7–9. pp. 945–960, 2003.
 - [28] R. Myers, D. Montgomery, e C. Anderson-cook, *Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, n. 1. 2014. 3rd Edition
 - [29] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed. Wiley 2004.

- [30] Z. L. Pereira e J. G. Requeijo, *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos - Qualidade*. 2008.
- [31] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, e L. A. Escaleira, «Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry», *Talanta*, vol. 76, n. 5, pp. 965–977, 2008.
- [32] S. Mondim, «Metodologias de Superfície de Resposta: uma investigação no âmbito da indústria cerâmica e do vidro», 2014. Tese Mestrado - Universidade Aberta, Brasil
- [33] J. A. Cornell, *How to apply response surface methodology*. 1990. Volume 8. American Society for Quality - Statistics Division
- [34] «Central Composite Designs (CCD)», *Engineering Statistics Handbook*. [Em linha]. Disponível em: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>. [Acedido: 18-Mai-2018].
- [35] J. B. Bruce, *Workshop Process, Practices and Materials*. 1997.
- [36] David Esteves Guedes, «Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos», Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [37] A. Silva, J. Dias, L. Sousa, e C. T. Ribeiro, «Desenho Técnico Moderno», p. 704, 2004. 12ª Edição. LIDEL
- [38] A. Mourão, «Desenho Técnico - Noções de acabamentos superficiais e de tolerâncias dimensionais», 2010. Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL
- [39] N. A. Feidenhans'l, «Optical Characterization of Nanostructured Surfaces», vol. 1, n. 1, pp. 1–4, 2016.
- [40] L. V. da Cunha, *Desenho Técnico*, 15ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian. 2004

ANEXOS

Anexo A

Resultados da experiência de screening do estudo do acabamento superficial

Impressora: Blocks Zero

Tabela A.1 - Resultados obtidos na medição da rugosidade na face A dos provetes produzidos pela impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

Ensaio nº	Ec (mm)	% I (%)	v (mm/s)	T (°C)	θ (°)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	0	1,178	2,896	2,736	2,270	0,901
2	0,2	25	40	200	0	4,926	4,289	4,903	4,706	0,131
3	0,1	75	40	200	0	5,183	3,236	4,2	4,206	0,948
4	0,2	75	40	200	0	8,508	7,963	8,277	8,249	0,075
5	0,1	25	80	200	0	6,536	5,48	7,537	6,518	1,058
6	0,2	25	80	200	0	8,953	9,236	9,188	9,126	0,023
7	0,1	75	80	200	0	4,33	4,208	4,259	4,266	0,004
8	0,2	75	80	200	0	8,426	8,52	8,886	8,611	0,059
9	0,1	25	40	220	0	4,239	4,177	2,25	3,555	1,279
10	0,2	25	40	220	0	4,935	7,335	4,877	5,716	1,968
11	0,1	75	40	220	0	1,773	2,439	2,29	2,167	0,122
12	0,2	75	40	220	0	8,791	7,053	7,002	7,615	1,037
13	0,1	25	80	220	0	5,59	4,107	3,873	4,523	0,867
14	0,2	25	80	220	0	5,623	5,625	9,051	6,766	3,915
15	0,1	75	80	220	0	4,098	4,438	3,622	4,053	0,168
16	0,2	75	80	220	0	5,863	5,136	4,716	5,238	0,337
17	0,1	25	40	200	45	10,51	11,037	10,1	10,549	0,221
18	0,2	25	40	200	45	13,43	13,182	12,973	13,195	0,052
19	0,1	75	40	200	45	9,307	9,211	9,094	9,204	0,011
20	0,2	75	40	200	45	12,612	12,142	12,11	12,288	0,079
21	0,1	25	80	200	45	13,085	12,055	14,003	13,048	0,950
22	0,2	25	80	200	45	11,836	11,611	11,809	11,752	0,015
23	0,1	75	80	200	45	13,903	12,81	11,851	12,855	1,054
24	0,2	75	80	200	45	11,836	11,491	11,482	11,603	0,041
25	0,1	25	40	220	45	12,633	12,536	10,994	12,054	0,846
26	0,2	25	40	220	45	10,953	10,576	10,994	10,841	0,053
27	0,1	75	40	220	45	11,023	9,608	9,707	10,113	0,624
28	0,2	75	40	220	45	10,247	8,608	8,6	9,152	0,900
29	0,1	25	80	220	45	14,912	13,241	13,393	13,849	0,854
30	0,2	25	80	220	45	12,456	12,088	11,707	12,084	0,140
31	0,1	75	80	220	45	12,14	12,369	12,257	12,255	0,013
32	0,2	75	80	220	45	12,877	11,825	11,02	11,907	0,867

Tabela A.2 - Resultados obtidos na medição da rugosidade na face B dos provetes produzidos pela impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

Ensaio nº	Ec (mm)	%I (%)	v (mm/s)	T (°C)	θ (°)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	0	6,751	6,967	6,790	6,836	0,013
2	0,2	25	40	200	0	7,983	7,511	7,582	7,692	0,065
3	0,1	75	40	200	0	6,816	5,847	6,027	6,230	0,266
4	0,2	75	40	200	0	10,251	10,693	10,66	10,535	0,061
5	0,1	25	80	200	0	9,536	7,623	7,965	8,375	1,041
6	0,2	25	80	200	0	8,238	8,109	8,090	8,146	0,006
7	0,1	75	80	200	0	6,851	6,623	6,739	6,738	0,013
8	0,2	75	80	200	0	9,018	9,533	9,649	9,400	0,113
9	0,1	25	40	220	0	7,064	7,469	7,194	7,242	0,043
10	0,2	25	40	220	0	8,774	9,293	8,819	8,962	0,083
11	0,1	75	40	220	0	6,731	6,984	6,776	6,830	0,018
12	0,2	75	40	220	0	11,934	11,192	11,562	11,563	0,138
13	0,1	25	80	220	0	7,226	7,593	7,016	7,278	0,085
14	0,2	25	80	220	0	9,352	9,063	8,501	8,972	0,187
15	0,1	75	80	220	0	6,014	6,509	6,183	6,235	0,063
16	0,2	75	80	220	0	9,785	8,765	8,973	9,174	0,291
17	0,1	25	40	200	45	10,693	10,284	10,107	10,361	0,090
18	0,2	25	40	200	45	12,716	12,983	12,992	12,897	0,025
19	0,1	75	40	200	45	9,376	9,513	9,444	9,444	0,005
20	0,2	75	40	200	45	12,484	12,047	11,917	12,149	0,088
21	0,1	25	80	200	45	12,802	12,430	12,731	12,654	0,039
22	0,2	25	80	200	45	11,542	11,978	11,907	11,809	0,055
23	0,1	75	80	200	45	12,916	12,614	12,701	12,744	0,024
24	0,2	75	80	200	45	11,038	11,867	11,743	11,549	0,200
25	0,1	25	40	220	45	11,937	11,746	11,900	11,861	0,010
26	0,2	25	40	220	45	11,017	10,900	11,157	11,025	0,017
27	0,1	75	40	220	45	10,814	10,904	10,897	10,872	0,003
28	0,2	75	40	220	45	10,147	10,02	10,043	10,070	0,005
29	0,1	25	80	220	45	13,750	13,523	13,470	13,581	0,022
30	0,2	25	80	220	45	12,893	11,74	11,722	12,118	0,450
31	0,1	75	80	220	45	11,935	11,746	11,703	11,795	0,015
32	0,2	75	80	220	45	10,99	11,972	11,904	11,622	0,301

Tabela A.3 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A dos provetes produzidos na impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Rugosidade A; R-sqr=,85154; Adj.: ,82299 2**(5-0) design; MS Residual=2,314571 DV: Rugosidade A					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	17,0591	1	17,0591	7,3703	0,011621
(2)% Infill	1,4319	1	1,4319	0,6186	0,438669
(3)Velocidade de Impressão	15,9213	1	15,9213	6,8787	0,014395
(4)Temperatura de Extrusão	3,4819	1	3,4819	1,5044	0,230994
(5)Orientação	307,2865	1	307,2865	132,7618	0,000000
Error	60,1788	26	2,3146		
Total SS	405,3595	31			

Tabela A.4 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B dos provetes produzidos na impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Rugosidade B; R-sqr=,73215; Adj.: ,68064 2**(5-0) design; MS Residual=1,578439 DV: Rugosidade B					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	10,8186	1	10,81861	6,85399	0,014553
(2)% Infill	0,2556	1	0,25555	0,16190	0,690700
(3)Velocidade de Impressão	1,8150	1	1,81499	1,14986	0,293431
(4)Temperatura de Extrusão	0,0842	1	0,08422	0,05336	0,819129
(5)Orientação	99,2065	1	99,20652	62,85103	0,000000
Error	41,0394	26	1,57844		
Total SS	153,2193	31			

Impressora: Blocks One

Tabela A.5 - Resultados obtidos na medição da rugosidade na face A dos provetes produzidos pela impressora Blocks One (experiência de *screening*)

Ensaio nº	Ec (mm)	%I (%)	V (mm/s)	T (°C)	Θ (°)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	0	1,964	2,101	3,745	2,603	0,982
2	0,2	25	40	200	0	6,801	6,781	7,152	6,911	0,044
3	0,1	75	40	200	0	1,668	3,548	4,202	3,139	1,731
4	0,2	75	40	200	0	7,72	7,166	7,846	7,577	0,131
5	0,1	25	80	200	0	2,958	4,531	5,629	4,373	1,802
6	0,2	25	80	200	0	7,503	8,725	8,474	8,234	0,417
7	0,1	75	80	200	0	6,117	6,456	4,404	5,659	1,210
8	0,2	75	80	200	0	7,304	6,654	7,218	7,059	0,125
9	0,1	25	40	220	0	4,529	1,917	1,508	2,651	2,686
10	0,2	25	40	220	0	5,087	7,024	6,451	6,187	0,990
11	0,1	75	40	220	0	4,044	1,34	2,669	2,684	1,828
12	0,2	75	40	220	0	3,832	6,205	5,948	5,328	1,696
13	0,1	25	80	220	0	4,995	2,261	3,826	3,694	1,882
14	0,2	25	80	220	0	8,197	8,286	4,988	7,157	3,530
15	0,1	75	80	220	0	3,592	5,485	3,700	4,259	1,130
16	0,2	75	80	220	0	4,219	7,491	3,569	5,093	4,418
17	0,1	25	40	200	45	11,486	11,451	11,738	11,558	0,025
18	0,2	25	40	200	45	11,292	11,518	11,687	11,499	0,039
19	0,1	75	40	200	45	11,657	11,555	9,518	10,910	1,456
20	0,2	75	40	200	45	10,982	11,374	11,256	11,204	0,040
21	0,1	25	80	200	45	11,969	12,095	11,895	11,986	0,010
22	0,2	25	80	200	45	12,245	11,24	11,547	11,677	0,265
23	0,1	75	80	200	45	12,858	13,825	11,344	12,676	1,564
24	0,2	75	80	200	45	11,211	11,506	11,409	11,375	0,023
25	0,1	25	40	220	45	11,281	11,109	11,417	11,269	0,024
26	0,2	25	40	220	45	11,557	10,824	10,859	11,080	0,171
27	0,1	75	40	220	45	11,001	10,574	10,795	10,790	0,046
28	0,2	75	40	220	45	10,717	11,391	10,852	10,987	0,127
29	0,1	25	80	220	45	11,42	11,066	11,124	11,203	0,036
30	0,2	25	80	220	45	11,399	12,058	11,522	11,660	0,123
31	0,1	75	80	220	45	11,017	11,286	11,485	11,263	0,055
32	0,2	75	80	220	45	11,85	12,102	11,875	11,942	0,019

Tabela A.6 - Resultados obtidos na medição da rugosidade na face B dos provetes produzidos pela impressora Blocks One (experiência de *screening*)

Ensaio nº	Ec (mm)	%I (%)	v (mm/s)	T (°C)	θ (°)	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	0	6,274	6,639	6,797	6,570	0,072
2	0,2	25	40	200	0	9,722	8,602	7,802	8,709	0,930
3	0,1	75	40	200	0	6,245	6,657	6,739	6,547	0,070
4	0,2	75	40	200	0	9,174	10,009	10,387	9,857	0,385
5	0,1	25	80	200	0	6,045	6,095	5,995	6,045	0,002
6	0,2	25	80	200	0	7,5	9,331	9,342	8,724	1,124
7	0,1	75	80	200	0	6,058	6,216	6,127	6,134	0,006
8	0,2	75	80	200	0	9,431	9,306	9,394	9,377	0,004
9	0,1	25	40	220	0	7,365	6,452	6,779	6,865	0,214
10	0,2	25	40	220	0	9,792	9,945	9,049	9,595	0,230
11	0,1	75	40	220	0	6,656	6,415	6,772	6,614	0,033
12	0,2	75	40	220	0	9,694	9,554	9,364	9,537	0,027
13	0,1	25	80	220	0	6,331	6,306	6,381	6,339	0,001
14	0,2	25	80	220	0	9,424	9,125	8,96	9,170	0,055
15	0,1	75	80	220	0	6,292	6,568	6,12	6,327	0,051
16	0,2	75	80	220	0	9,052	9,057	8,989	9,033	0,001
17	0,1	25	40	200	45	11,556	11,484	11,399	11,480	0,006
18	0,2	25	40	200	45	12,264	10,911	12,044	11,740	0,527
19	0,1	75	40	200	45	11,145	11,288	10,5	10,978	0,176
20	0,2	75	40	200	45	11,684	11,431	11,43	11,515	0,021
21	0,1	25	80	200	45	12,095	11,909	12,104	12,036	0,012
22	0,2	25	80	200	45	11,747	11,243	11,446	11,479	0,064
23	0,1	75	80	200	45	13,59	12,933	10,982	12,502	1,840
24	0,2	75	80	200	45	12	11,37	10,891	11,420	0,309
25	0,1	25	40	220	45	10,455	10,772	10,735	10,654	0,030
26	0,2	25	40	220	45	10,974	10,849	11,162	10,995	0,025
27	0,1	75	40	220	45	10,403	10,299	10,286	10,329	0,004
28	0,2	75	40	220	45	11,126	11,679	11,43	11,412	0,077
29	0,1	25	80	220	45	11,234	11,122	11,589	11,315	0,059
30	0,2	25	80	220	45	11,836	12,363	12,226	12,142	0,075
31	0,1	75	80	220	45	10,258	10,165	10,299	10,241	0,005
32	0,2	75	80	220	45	11,412	11,383	11,3	11,365	0,003

Tabela A 7 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade A dos provetes produzidos na impressora Blocks One (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Rugosidade A; R-sqr=,92031; Adj:,90499 2**(5-0) design; MS Residual=1,142493 DV: Rugosidade A					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	18,3815	1	18,3815	16,0889	0,000454
(2)% Infill	0,1011	1	0,1011	0,0885	0,768510
(3)Velocidade de Impressão	5,2248	1	5,2248	4,5732	0,042041
(4)Temperatura de Extrusão	3,9156	1	3,9156	3,4272	0,075521
(5)Orientação	315,4423	1	315,4423	276,1000	0,000000
Error	29,7048	26	1,1425		
Total SS	372,7701	31			

Tabela A 8 - Tabela ANOVA referente à Rugosidade B dos provetes produzidos na impressora Blocks One (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Rugosidade B; R-sqr=,85945; Adj:,83242 2**(5-0) design; MS Residual=,7429126 DV: Rugosidade B					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	19,5417	1	19,54167	26,3041	0,000024
(2)% Infill	0,0179	1	0,01792	0,0241	0,877764
(3)Velocidade de Impressão	0,0036	1	0,00356	0,0048	0,945371
(4)Temperatura de Extrusão	0,2986	1	0,29864	0,4020	0,531608
(5)Orientação	98,2498	1	98,24983	132,2495	0,000000
Error	19,3157	26	0,74291		
Total SS	137,4273	31			

Anexo B

Resultados obtidos na experiência de *screening* do estudo dos desvios dimensionais

Impressora: Blocks Zero

Tabela B 1 - Resultados obtidos para a resposta Desvio X na experiência de *screening* (Impressora: Blocks Zero)

Ensaio n°	Ec (mm)	%I (%)	v (mm/s)	T (°C)	Dimensão X (mm)			Desvio X (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	15,07	14,99	15	0,07	-0,01	0	0,027	0,001
2	0,2	25	40	200	15,13	15,04	15,07	0,13	0,04	0,07	0,080	0,002
3	0,1	75	40	200	15,16	15,1	15,17	0,16	0,1	0,17	0,143	0,001
4	0,2	75	40	200	14,96	15,08	15,01	-0,04	0,08	0,01	0,043	0,001
5	0,1	25	80	200	15,04	14,99	15,02	0,04	-0,01	0,02	0,023	0,000
6	0,2	25	80	200	14,94	14,98	15,04	-0,06	-0,02	0,04	0,040	0,000
7	0,1	75	80	200	15,15	15,18	15,17	0,15	0,18	0,17	0,167	0,000
8	0,2	75	80	200	15,01	15,02	14,92	0,01	0,02	-0,08	0,037	0,001
9	0,1	25	40	220	15,02	14,98	15	0,02	-0,02	0	0,013	0,000
10	0,2	25	40	220	14,94	15,01	14,9	-0,06	0,01	-0,1	0,057	0,002
11	0,1	75	40	220	14,95	15,04	14,99	-0,05	0,04	-0,01	0,033	0,000
12	0,2	75	40	220	14,91	14,91	14,92	-0,09	-0,09	-0,08	0,087	0,000
13	0,1	25	80	220	15,01	15,05	15,08	0,01	0,05	0,08	0,047	0,001
14	0,2	25	80	220	14,94	14,85	14,97	-0,06	-0,15	-0,03	0,080	0,004
15	0,1	75	80	220	14,93	14,94	14,94	-0,07	-0,06	-0,06	0,063	0,000
16	0,2	75	80	220	14,94	14,95	15,21	-0,06	-0,05	0,21	0,107	0,008

Tabela B 2 - Resultados obtidos para a resposta Desvio Y na experiência de *screening* (Impressora: Blocks Zero)

Ensaio nº	Ec (mm)	%I (%)	V (mm/s)	T (°C)	Dimensão Y (mm)			Desvio Y (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	14,99	15,02	15,08	-0,01	0,02	0,08	0,037	0,001
2	0,2	25	40	200	15,01	15	15,04	0,01	0	0,04	0,017	0,000
3	0,1	75	40	200	15,11	15,08	15,1	0,11	0,08	0,1	0,097	0,000
4	0,2	75	40	200	15,06	15	15,1	0,06	0	0,1	0,053	0,003
5	0,1	25	80	200	14,98	15,06	15,11	-0,02	0,06	0,11	0,063	0,002
6	0,2	25	80	200	14,97	14,92	14,9	-0,03	-0,08	-0,1	0,070	0,001
7	0,1	75	80	200	15,18	15,16	15,12	0,18	0,16	0,12	0,153	0,001
8	0,2	75	80	200	15,05	15	15,03	0,05	0	0,03	0,027	0,001
9	0,1	25	40	220	15	14,99	15,1	0	-0,01	0,1	0,037	0,003
10	0,2	25	40	220	15	14,99	15,02	0	-0,01	0,02	0,010	0,000
11	0,1	75	40	220	14,99	14,97	14,95	-0,01	-0,03	-0,05	0,030	0,000
12	0,2	75	40	220	14,91	14,99	14,96	-0,09	-0,01	-0,04	0,047	0,002
13	0,1	25	80	220	14,95	15,02	14,94	-0,05	0,02	-0,06	0,043	0,000
14	0,2	25	80	220	14,85	14,85	14,89	-0,15	-0,15	-0,11	0,137	0,001
15	0,1	75	80	220	14,91	14,91	14,86	-0,09	-0,09	-0,14	0,107	0,001
16	0,2	75	80	220	14,96	15,16	15,25	-0,04	0,16	0,25	0,150	0,011

Tabela B 3 - Resultados obtidos para a resposta Desvio Z na experiência de screening (Impressora: Blocks Zero)

Ensaio n°	Ec (mm)	%I (%)	V (mm/s)	T (°C)	Dimensão Z (mm)			Desvio Z (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	14,69	14,67	14,5	-0,31	-0,33	-0,5	-0,380	0,011
2	0,2	25	40	200	14,98	15,03	14,99	-0,02	0,03	-0,01	-0,020	0,000
3	0,1	75	40	200	14,94	14,97	14,92	-0,06	-0,03	-0,08	-0,057	0,001
4	0,2	75	40	200	14,62	14,88	14,37	-0,38	-0,12	-0,63	-0,377	0,065
5	0,1	25	80	200	14,79	14,79	14,71	-0,21	-0,21	-0,29	-0,237	0,002
6	0,2	25	80	200	14,33	14,6	14,52	-0,67	-0,4	-0,48	-0,517	0,019
7	0,1	75	80	200	14,71	14,79	14,82	-0,29	-0,21	-0,18	-0,227	0,003
8	0,2	75	80	200	14,55	14,71	14,68	-0,45	-0,29	-0,32	-0,353	0,007
9	0,1	25	40	220	14,52	14,44	14,34	-0,48	-0,56	-0,66	-0,567	0,008
10	0,2	25	40	220	14,75	14,58	14,68	-0,25	-0,42	-0,32	-0,330	0,007
11	0,1	75	40	220	14,26	14,58	14,31	-0,74	-0,42	-0,69	-0,617	0,030
12	0,2	75	40	220	14,68	14,73	14,67	-0,32	-0,27	-0,33	-0,307	0,001
13	0,1	25	80	220	14,58	14,6	14,61	-0,42	-0,4	-0,39	-0,403	0,000
14	0,2	25	80	220	14,67	14,65	14,5	-0,33	-0,35	-0,5	-0,393	0,009
15	0,1	75	80	220	14,64	14,67	14,64	-0,36	-0,33	-0,36	-0,350	0,000
16	0,2	75	80	220	14,82	14,45	14,5	-0,18	-0,55	-0,5	-0,410	0,040

Tabela B 4 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X dos provetes produzidos na impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio X; R-sqr=,75251; Adj:,66251 2**(4-0) design; MS Residual=,0017374 DV: Desvio X					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,026136	1	0,026136	15,04346	0,002570
(2)% Infill	0,001225	1	0,001225	0,70509	0,418956
(3)Velocidade de Impressão	0,010678	1	0,010678	6,14593	0,030623
(4)Temperatura de Extrusão	0,020069	1	0,020069	11,55160	0,005942
Error	0,019111	11	0,001737		
Total SS	0,077219	15			

Tabela B 5 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y dos provetes produzidos na impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio Y; R-sqr=,61248; Adj:,47156 2**(4-0) design; MS Residual=,0032931 DV: Desvio Y					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,035156	1	0,035156	10,67567	0,007500
(2)% Infill	0,002756	1	0,002756	0,83697	0,379882
(3)Velocidade de Impressão	0,004334	1	0,004334	1,31609	0,275636
(4)Temperatura de Extrusão	0,015006	1	0,015006	4,55685	0,056122
Error	0,036224	11	0,003293		
Total SS	0,093477	15			

Tabela B 6 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z dos provetes produzidos na impressora Blocks Zero (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio Z; R-sqr=,56388; Adj:,40529 2**(4-0) design; MS Residual=,0156325 DV: Desvio Z					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,079806	1	0,079806	5,105145	0,045135
(2)% Infill	0,014601	1	0,014601	0,933995	0,354594
(3)Velocidade de Impressão	0,085556	1	0,085556	5,472969	0,039211
(4)Temperatura de Extrusão	0,042367	1	0,042367	2,710208	0,127951
Error	0,171958	11	0,015633		
Total SS	0,394288	15			

Impressora: Blocks One

Tabela B 7 - Resultados obtidos para a resposta Desvio X na experiência de *screening* (Impressora: Blocks One)

Ensaio n°	Ec (mm)	I (%)	v (mm/s)	T (°C)	Dimensão X (mm)			Desvio X (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	14,96	15,03	15,02	-0,04	0,03	0,02	0,003	0,001
2	0,2	25	40	200	15,12	15,2	15,2	0,12	0,2	0,2	0,173	0,002
3	0,1	75	40	200	15,36	15,25	15,33	0,36	0,25	0,33	0,313	0,003
4	0,2	75	40	200	15,07	15,05	15,18	0,07	0,05	0,18	0,100	0,005
5	0,1	25	80	200	15,3	15,4	15,31	0,3	0,4	0,31	0,337	0,003
6	0,2	25	80	200	14,93	14,93	14,91	-0,07	-0,07	-0,09	-0,077	0,000
7	0,1	75	80	200	15,29	15,33	15,29	0,29	0,33	0,29	0,303	0,001
8	0,2	75	80	200	15,07	15,05	15,05	0,07	0,05	0,05	0,057	0,000
9	0,1	25	40	220	15,09	15,05	15,08	0,09	0,05	0,08	0,073	0,000
10	0,2	25	40	220	14,99	15,13	15,08	-0,01	0,13	0,08	0,067	0,005
11	0,1	75	40	220	15,07	15,09	15,08	0,07	0,09	0,08	0,080	0,000
12	0,2	75	40	220	14,97	15,01	14,99	-0,03	0,01	-0,01	-0,010	0,000
13	0,1	25	80	220	15,01	15,01	15	0,01	0,01	0	0,007	0,000
14	0,2	25	80	220	14,94	14,95	14,92	-0,06	-0,05	-0,08	-0,063	0,000
15	0,1	75	80	220	14,93	14,89	15,07	-0,07	-0,11	0,07	-0,037	0,009
16	0,2	75	80	220	14,98	14,93	14,98	-0,02	-0,07	-0,02	-0,037	0,001

Tabela B 8 - Resultados obtidos para a resposta Desvio Y na experiência de *screening* (Impressora: Blocks One)

Ensaio nº	Ec (mm)	I (%)	V (mm/s)	T (°C)	Dimensão Y (mm)			Desvio Y (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	15,01	15,04	15,02	0,01	0,04	0,02	0,023	0,000
2	0,2	25	40	200	15,15	15,2	15,17	0,15	0,2	0,17	0,173	0,001
3	0,1	75	40	200	15,4	15,28	15,33	0,4	0,28	0,33	0,337	0,004
4	0,2	75	40	200	15,12	15,13	15,09	0,12	0,13	0,09	0,113	0,000
5	0,1	25	80	200	15,24	15,27	15,3	0,24	0,27	0,3	0,270	0,001
6	0,2	25	80	200	14,92	14,94	14,93	-0,08	-0,06	-0,07	-0,070	0,000
7	0,1	75	80	200	15,28	15,32	15,3	0,28	0,32	0,3	0,300	0,000
8	0,2	75	80	200	15,06	15,07	15,09	0,06	0,07	0,09	0,073	0,000
9	0,1	25	40	220	15,11	15,08	15,07	0,11	0,08	0,07	0,087	0,000
10	0,2	25	40	220	15	15,02	15,01	0	0,02	0,01	0,010	0,000
11	0,1	75	40	220	15,09	15,04	15,05	0,09	0,04	0,05	0,060	0,001
12	0,2	75	40	220	15,07	15,01	14,99	0,07	0,01	-0,01	0,023	0,002
13	0,1	25	80	220	15	15,02	15,06	0	0,02	0,06	0,027	0,001
14	0,2	25	80	220	14,95	14,92	14,92	-0,05	-0,08	-0,08	-0,070	0,000
15	0,1	75	80	220	14,99	14,93	14,99	-0,01	-0,07	-0,01	-0,030	0,001
16	0,2	75	80	220	15,02	14,99	15,04	0,02	-0,01	0,04	0,017	0,001

Tabela B 9 - Resultados obtidos para a resposta Desvio Z na experiência de *screening* (Impressora: Blocks One)

Ensaio nº	Ec (mm)	I (%)	v (mm/s)	T (°C)	Dimensão Z (mm)			Desvio Z (mm)				
					Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média	Variância
1	0,1	25	40	200	15,17	15,13	15,09	0,17	0,13	0,09	0,130	0,002
2	0,2	25	40	200	15,23	15,18	15,17	0,23	0,18	0,17	0,193	0,001
3	0,1	75	40	200	15,17	15,15	15,14	0,17	0,15	0,14	0,153	0,000
4	0,2	75	40	200	15,09	15,04	15,08	0,09	0,04	0,08	0,070	0,001
5	0,1	25	80	200	15,15	15,12	15,13	0,15	0,12	0,13	0,133	0,000
6	0,2	25	80	200	15,09	15,04	15,08	0,09	0,04	0,08	0,070	0,001
7	0,1	75	80	200	15,25	15,2	15,18	0,25	0,2	0,18	0,210	0,001
8	0,2	75	80	200	15,13	15,15	15,08	0,13	0,15	0,08	0,120	0,001
9	0,1	25	40	220	15,06	15,08	15,04	0,06	0,08	0,04	0,060	0,000
10	0,2	25	40	220	15,2	15,2	15,11	0,2	0,2	0,11	0,170	0,003
11	0,1	75	40	220	15,12	15,09	15,06	0,12	0,09	0,06	0,090	0,001
12	0,2	75	40	220	15,21	15,16	15,14	0,21	0,16	0,14	0,170	0,001
13	0,1	25	80	220	15,12	15,05	15,04	0,12	0,05	0,04	0,070	0,002
14	0,2	25	80	220	14,91	14,94	14,94	-0,09	-0,06	-0,06	-0,070	0,000
15	0,1	75	80	220	14,95	14,98	14,97	-0,05	-0,02	-0,03	-0,033	0,000
16	0,2	75	80	220	14,93	14,96	14,92	-0,07	-0,04	-0,08	-0,063	0,000

Tabela B 10 - Tabela ANOVA referente ao Desvio X dos provetes produzidos na impressora Blocks One (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio X; R-sqr=,8429; Adj:,78577 2**(4-0) design; MS Residual=,003881 DV: Desvio X					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,127806	1	0,127806	32,93129	0,000131
(2)% Infill	0,000084	1	0,000084	0,02165	0,885681
(3)Velocidade de Impressão	0,097656	1	0,097656	25,16267	0,000392
(4)Temperatura de Extrusão	0,003501	1	0,003501	0,90201	0,362644
Error	0,042691	11	0,003881		
Total SS	0,271738	15			

Tabela B 11 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Y dos provetes produzidos na impressora Blocks One (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio Y; R-sqr=,86598; Adj:,81724 2**(4-0) design; MS Residual=,0028719 DV: Desvio Y					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,124256	1	0,124256	43,26612	0,000040
(2)% Infill	0,000251	1	0,000251	0,08729	0,773151
(3)Velocidade de Impressão	0,069784	1	0,069784	24,29885	0,000450
(4)Temperatura de Extrusão	0,009834	1	0,009834	3,42422	0,091267
Error	0,031591	11	0,002872		
Total SS	0,235716	15			

Tabela B 12 - Tabela ANOVA referente ao Desvio Z dos provetes produzidos na impressora Blocks One (experiência de *screening*)

ANOVA; Var.:Desvio Z; R-sqr=,71749; Adj:,61475 2**(4-0) design; MS Residual=,0028924 DV: Desvio Z					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Espessura de Camada	0,027778	1	0,027778	9,60363	0,010123
(2)% Infill	0,000178	1	0,000178	0,06146	0,808765
(3)Velocidade de Impressão	0,051378	1	0,051378	17,76288	0,001449
(4)Temperatura de Extrusão	0,001469	1	0,001469	0,50803	0,490836
Error	0,031817	11	0,002892		
Total SS	0,112619	15			

Anexo C

Resultados do estudo do acabamento superficial e análise residual

Anexo C.1 - Impressora: Blocks Zero

Tabela C.1 - Resultados obtidos para a resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero)

Ensaio nº	Ec (mm)	v (mm/s)	θ (°)	Provete 1 (µm)	Provete 2 (µm)	Provete 3 (µm)	Média	Variância
1	0,07	25	15	14,131	14,468	15,142	14,580	0,265
2	0,13	25	15	26,213	26,531	26,777	26,507	0,080
3	0,07	75	15	14,921	14,709	14,454	14,695	0,055
4	0,13	75	15	27,268	26,597	27,171	27,012	0,132
5	0,07	25	75	7,900	8,939	8,323	8,387	0,273
6	0,13	25	75	12,142	10,499	11,479	11,373	0,683
7	0,07	75	75	6,953	8,111	7,655	7,573	0,340
8	0,13	75	75	11,201	11,748	10,946	11,298	0,168
9	0,05	50	45	10,891	9,012	10,164	10,022	0,898
10	0,15	50	45	20,153	19,522	20,266	19,980	0,161
11	0,1	8	45	15,092	15,272	15,045	15,136	0,014
12	0,1	92	45	13,758	15,655	14,037	14,483	1,049
13	0,1	50	-5	6,951	6,589	6,523	6,688	0,053
14	0,1	50	95	13,192	10,847	12,248	12,096	1,392
15	0,1	50	45	17,281	13,637	13,853	15,251	4,179
				18,088	13,395	-		

Tabela C.2 - Resultados obtidos para a resposta Rugosidade B (Impressora: Blocks Zero)

Ensaio nº	Ec (mm)	v (mm/s)	θ (°)	Provete 1 (µm)	Provete 2 (µm)	Provete 3 (µm)	Média	Variância
1	0,07	25	15	7,892	6,996	6,415	7,101	0,554
2	0,13	25	15	12,062	10,372	10,917	11,117	0,744
3	0,07	75	15	5,280	7,281	7,110	6,557	1,230
4	0,13	75	15	8,251	9,322	10,125	9,233	0,884
5	0,07	25	75	14,044	14,454	14,173	14,224	0,044
6	0,13	25	75	21,287	21,699	21,164	21,383	0,079
7	0,07	75	75	15,514	14,967	15,306	15,262	0,076
8	0,13	75	75	22,400	23,271	23,132	22,934	0,219
9	0,05	50	45	9,232	9,782	9,342	9,452	0,085
10	0,15	50	45	19,455	20,274	19,417	19,715	0,234
11	0,1	8	45	14,860	14,276	14,183	14,440	0,135
12	0,1	92	45	14,226	14,377	13,483	14,029	0,229

Ensaio n°	Ec (mm)	v (mm/s)	θ (°)	Provete 1 (μm)	Provete 2 (μm)	Provete 3 (μm)	Média	Variância
13	0,1	50	-5	14,239	14,717	14,500	14,485	0,057
14	0,1	50	95	8,145	6,516	7,290	7,317	0,664
15	0,1	50	45	15,017	17,496	17,589	16,199	2,298
				14,212	16,680	-		

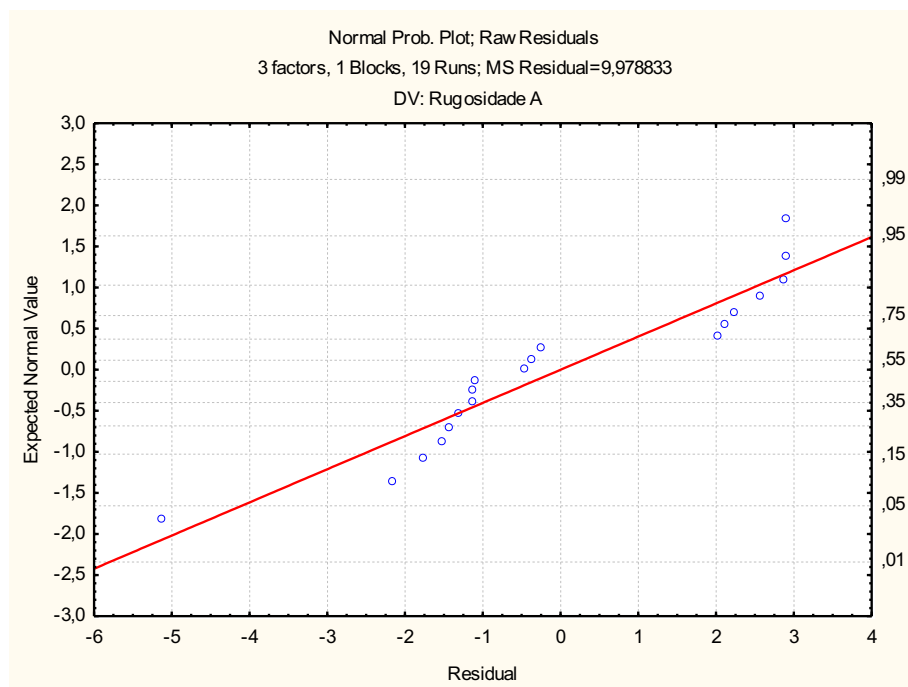


Figura C.1 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks Zero)

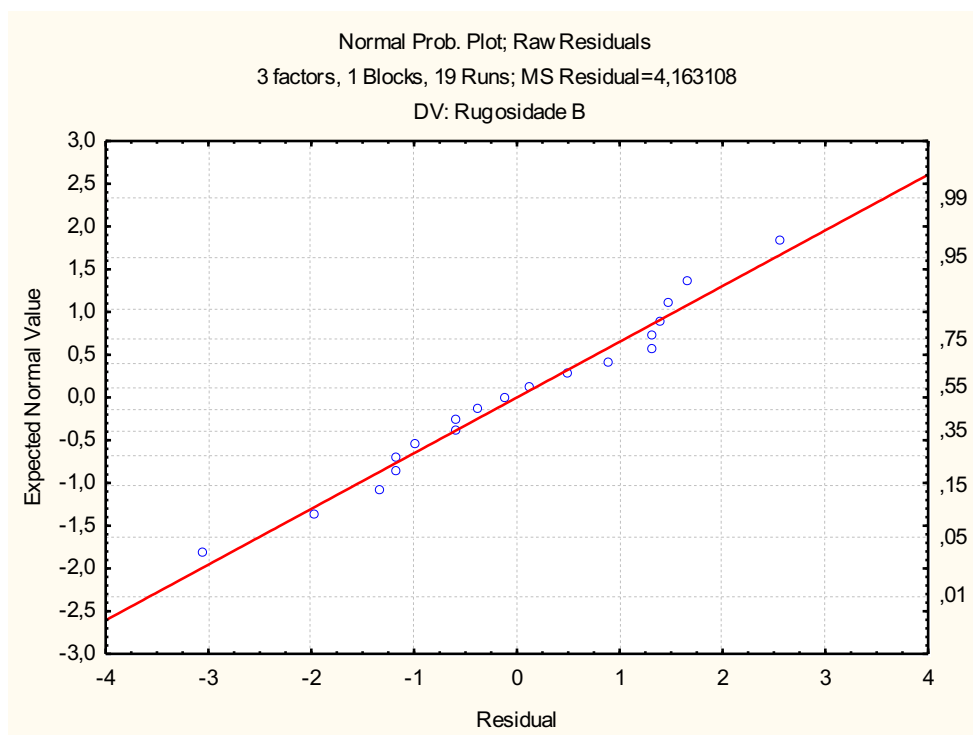


Figura C.2 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Rugosidade B

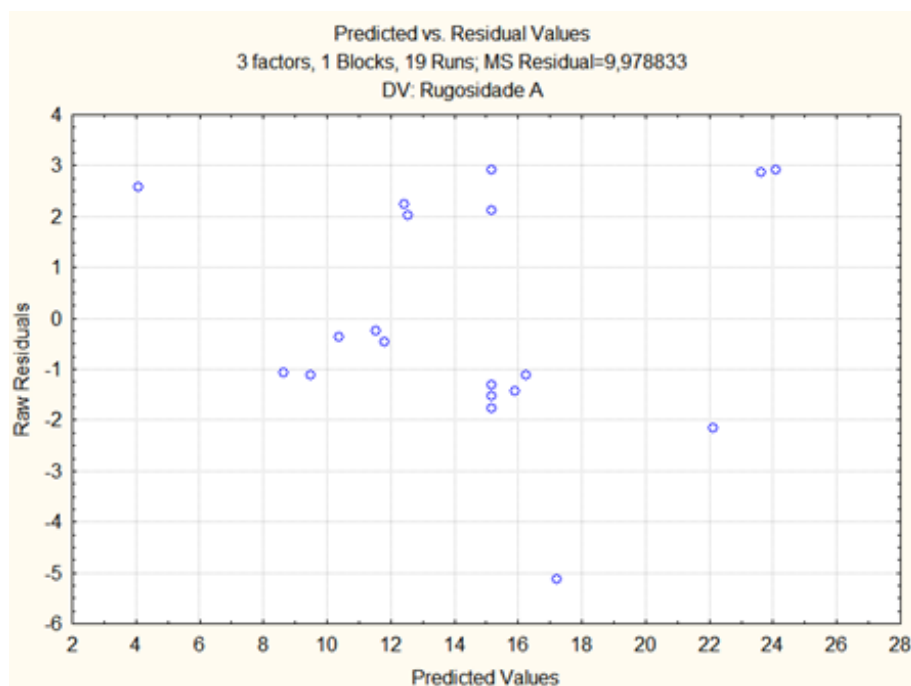


Figura C.3 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Rugosidade A

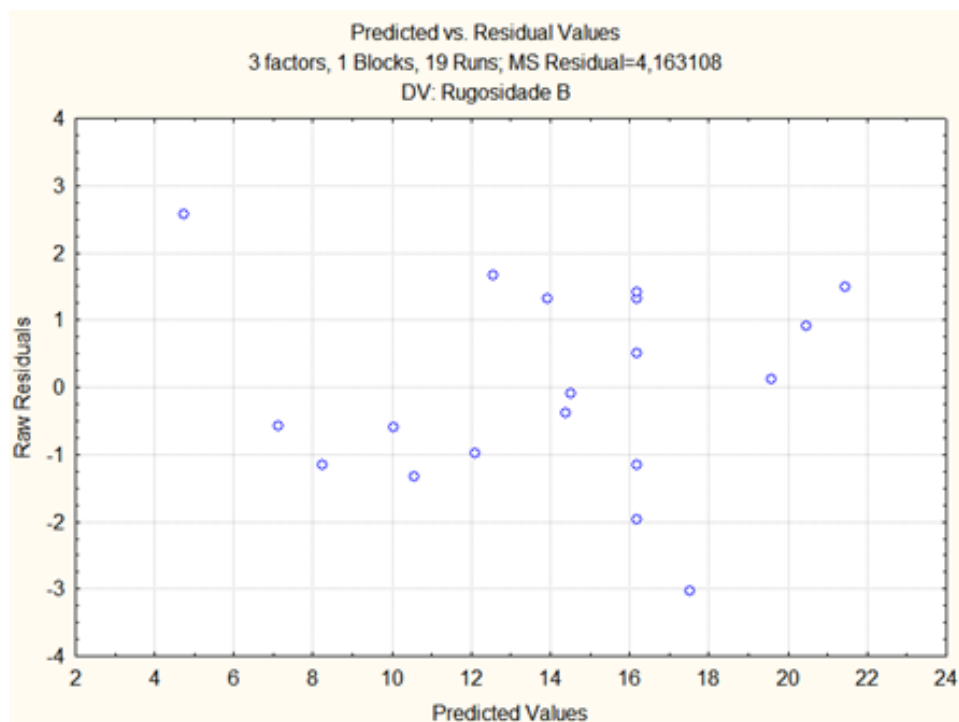


Figura C.4 - Gráfico dos resíduos em função dos valores previstos para a resposta Rugosidade B

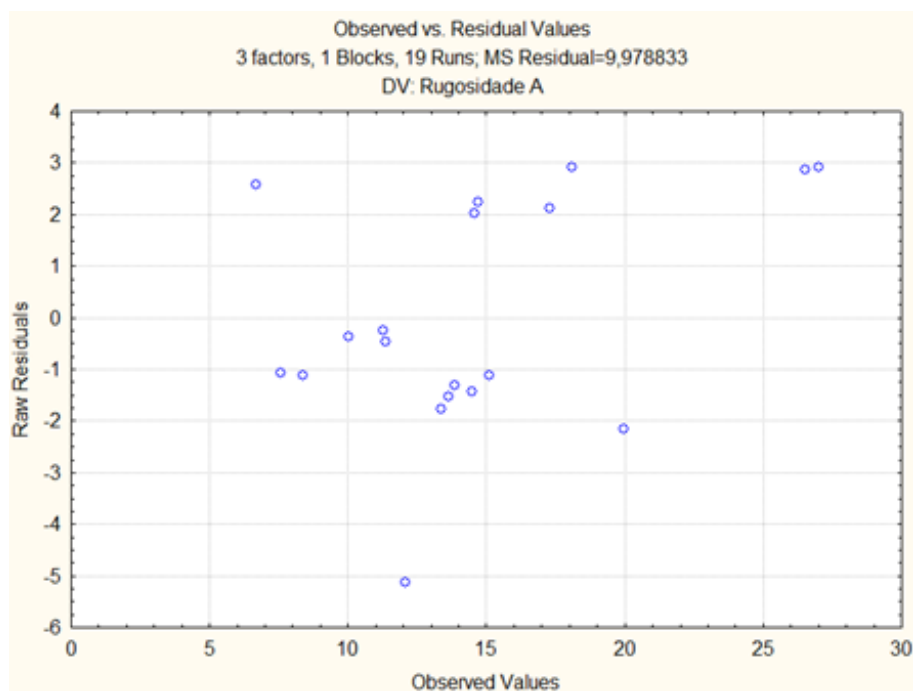


Figura C.5 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a resposta Rugosidade A

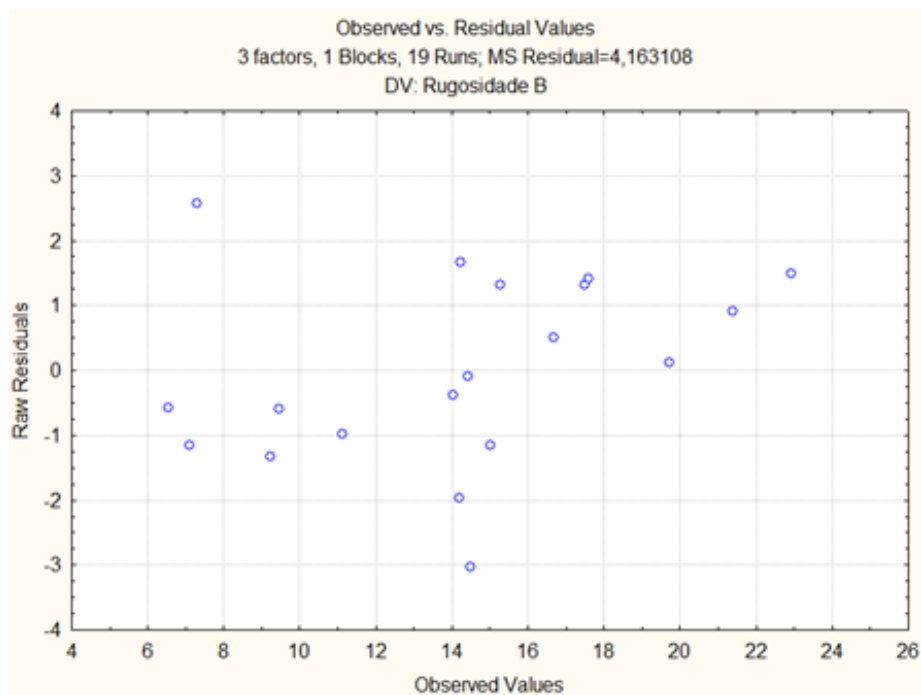


Figura C.6 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a resposta Rugosidade B

Os resíduos não indicam violam o pressuposto da normalidade uma vez que se dispõem em torno da reta e nas restantes figuras estão dispersos sem seguir uma tendência pelo que se pode assumir que não houve influência de fatores externos

Anexo C.2 - Impressora: Blocks One

Tabela C.3 - Resultados obtidos para a resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

Ensaio nº	Ec (mm)	v (mm/s)	θ (°)	Provete 1 (µm)	Provete 2 (µm)	Provete 3 (µm)	Média	Variância
1	0,07	25	15	13,310	13,334	13,363	13,336	0,001
2	0,13	25	15	24,951	26,846	25,839	25,879	0,899
3	0,07	75	15	14,416	14,343	14,200	14,320	0,012
4	0,13	75	15	28,644	28,558	27,819	28,340	0,206
5	0,07	25	75	7,038	6,645	5,796	6,493	0,403
6	0,13	25	75	12,752	10,757	12,160	11,890	1,050
7	0,07	75	75	6,201	6,104	7,239	6,515	0,396
8	0,13	75	75	10,660	9,626	9,496	9,927	0,407
9	0,05	50	45	6,944	6,677	6,597	6,739	0,033
10	0,15	50	45	17,805	17,480	18,207	17,831	0,133
11	0,1	8	45	12,937	13,633	14,518	13,696	0,628
12	0,1	92	45	12,343	12,008	11,942	12,098	0,046
13	0,1	50	95	7,829	7,720	7,393	7,647	0,051
14	0,1	50	-5	15,293	15,210	15,816	15,440	0,108
15	0,1	50	45	12,981	11,979	12,298	12,508	0,207
				12,991	12,289	-		

Tabela C.4 - Resultados obtidos para a resposta Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

Ensaio nº	Ec (mm)	v (mm/s)	θ (°)	Provete 1 (µm)	Provete 2 (µm)	Provete 3 (µm)	Média	Variância
1	0,07	25	15	6,492	7,020	6,112	6,541	0,208
2	0,13	25	15	10,694	10,690	11,090	10,825	0,053
3	0,07	75	15	6,132	6,736	6,267	6,378	0,101
4	0,13	75	15	10,284	10,217	10,316	10,272	0,003
5	0,07	25	75	15,057	14,820	14,802	14,893	0,020
6	0,13	25	75	27,785	28,491	28,575	28,284	0,188
7	0,07	75	75	14,261	14,243	13,807	14,104	0,066
8	0,13	75	75	27,593	27,258	26,853	27,235	0,137
9	0,05	50	45	6,426	6,640	6,285	6,450	0,032
10	0,15	50	45	17,847	18,830	18,809	18,495	0,315
11	0,1	8	45	13,734	13,514	13,280	13,509	0,052
12	0,1	92	45	12,501	11,731	12,192	12,141	0,150
13	0,1	50	95	13,680	14,403	10,976	13,020	3,263
14	0,1	50	-5	7,606	8,605	7,520	7,910	0,364
15	0,1	50	45	11,793	13,245	12,987	12,688	0,386

				12,292	13,122	-		
--	--	--	--	--------	--------	---	--	--

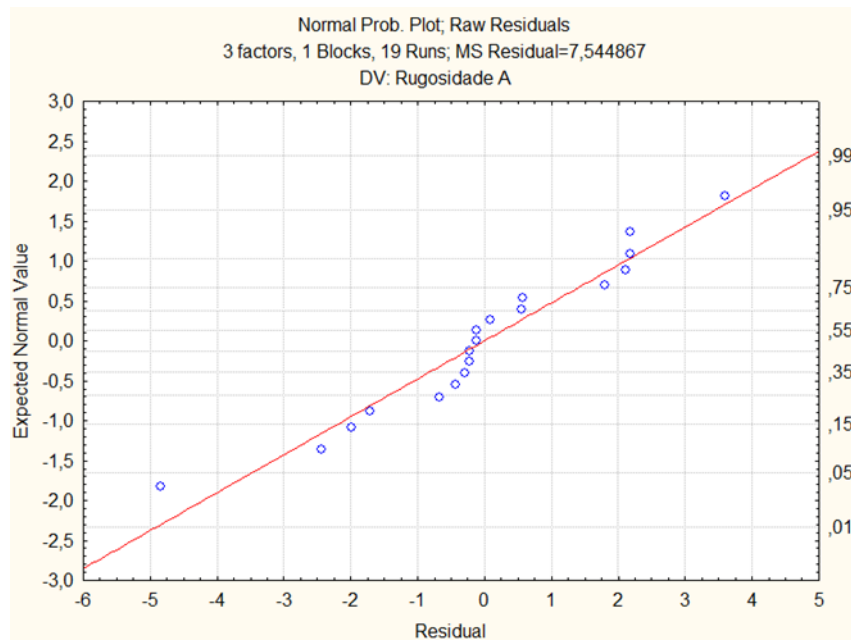


Figura C.7 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

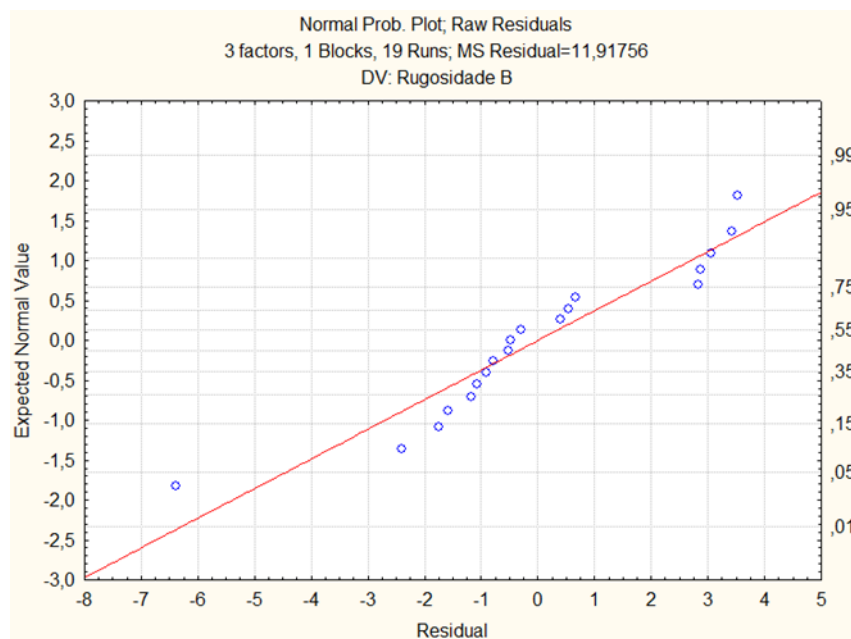


Figura C.8 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

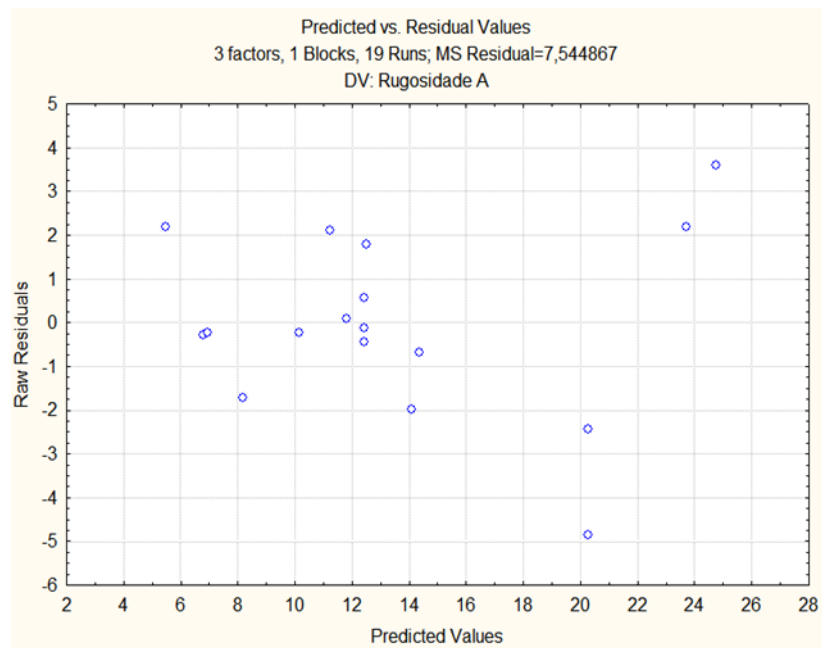


Figura C.9 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

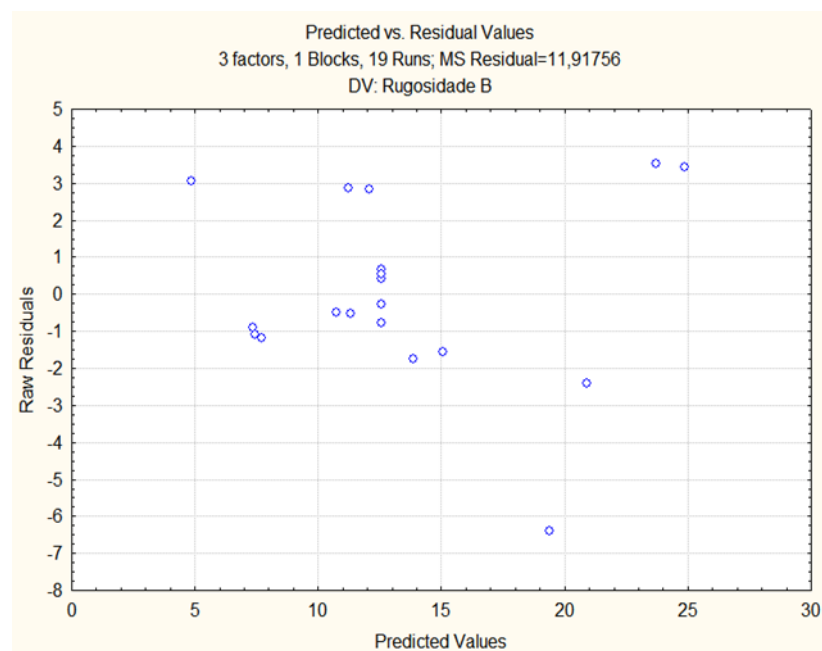


Figura C.10 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

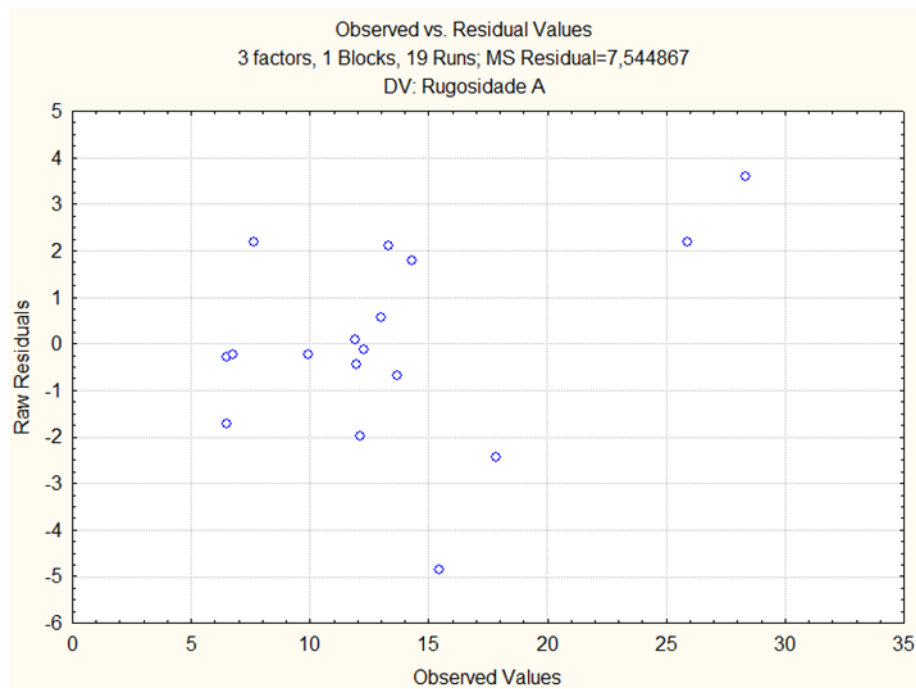


Figura C.11 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Rugosidade A (Impressora: Blocks One)

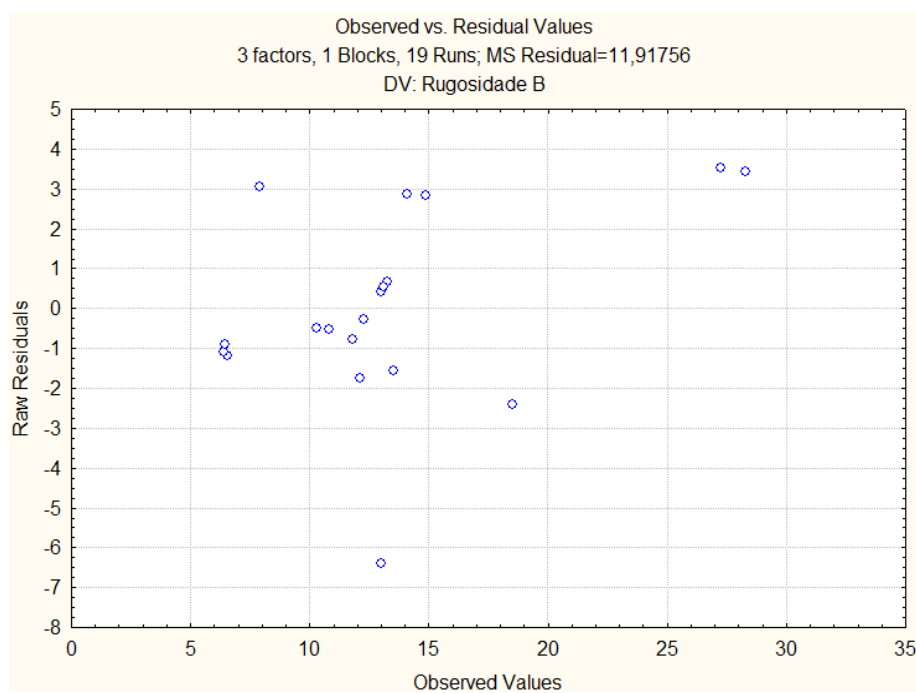


Figura C.12 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Rugosidade B (Impressora: Blocks One)

Os resíduos não violam o pressuposto da normalidade uma vez que se dispõem em torno da reta e nas restantes figuras estão dispersos sem seguir uma tendência pelo que se pode assumir que não houve influência de fatores externos

Anexo D

Resultado do estudo dos desvios dimensionais e análise residual

Anexo D.1 - Impressora: Blocks Zero

Tabela D 1 - Resultados experimentais obtidos para as respostas: Desvio X, Desvio Y e Desvio Z (impressora: Blocks Zero)

Ensaio nº	D (mm)	Ec (mm)	v (mm/s)	T (°C)	DIM X (mm)	DIM Y (mm)	DIM Z (mm)	DES X (mm)	DES Y (mm)	DES Z (mm)
1	20	0,2	70	215	20,10	20,15	19,70	0,1	0,15	-0,3
2	50	0,2	70	215	50,06	49,88	49,68	0,06	-0,12	-0,32
3	20	0,1	70	215	20,04	19,97	19,61	0,04	-0,03	-0,39
4	50	0,1	70	215	49,96	49,91	49,41	-0,04	-0,09	-0,59
5	20	0,2	30	215	19,96	20,02	20,10	-0,04	0,02	0,1
6	50	0,2	30	215	49,90	49,83	49,93	-0,1	-0,17	-0,07
7	20	0,1	30	215	20,08	19,99	19,40	0,08	-0,01	-0,6
8	50	0,1	30	215	49,94	49,91	49,46	-0,06	-0,09	-0,54
9	20	0,2	70	205	20,07	20,08	19,80	0,07	0,08	-0,2
10	50	0,2	70	205	49,97	49,83	49,70	-0,03	-0,17	-0,3
11	20	0,1	70	205	19,97	20,04	20,00	-0,03	0,04	0
12	50	0,1	70	205	49,99	49,95	49,80	-0,01	-0,05	-0,2
13	20	0,2	30	205	20,01	20,09	20,11	0,01	0,09	0,11
14	50	0,2	30	205	49,95	49,82	49,95	-0,05	-0,18	-0,05
15	20	0,1	30	205	19,98	19,91	19,62	-0,02	-0,09	-0,38
16	50	0,1	30	205	49,97	49,8	49,47	-0,03	-0,2	-0,53
17	5	0,15	50	210	4,99	4,99	4,64	-0,01	-0,01	-0,36
18	65	0,15	50	210	65,35	65,34	64,80	0,35	0,34	-0,2
19	35	0,05	50	210	34,92	34,9	34,83	-0,08	-0,1	-0,17
20	35	0,25	50	210	34,97	34,97	34,88	-0,03	-0,03	-0,12
21	35	0,15	10	210	34,92	34,81	34,80	-0,08	-0,19	-0,2
22	35	0,15	90	210	34,94	34,95	34,81	-0,06	-0,05	-0,19
23	35	0,15	50	200	34,91	34,89	34,88	-0,09	-0,11	-0,12
24	35	0,15	50	220	35,09	34,96	34,81	0,09	-0,04	-0,19
25*	35	0,15	50	210	34,99	35,06	35,01	-0,01	0,06	0,01
26*	35	0,15	50	210	34,99	34,98	34,85	-0,01	-0,02	-0,15
27*	35	0,15	50	210	34,92	34,98	34,94	-0,08	-0,02	-0,06
28*	35	0,15	50	210	35,08	34,94	34,89	0,08	-0,06	-0,11
29*	35	0,15	50	210	35,03	35,05	34,95	0,03	0,05	-0,05

*Ponto zero replicado 4 vezes

DIM X: Dimensão medida em X; **DIM Y:** Dimensão medida em Y; **DIM Z:** Dimensão medida em Z

DES X: Desvio obtido em X; **DES Y:** Desvio obtido em Y; **DES Z:** Desvio obtido em Z

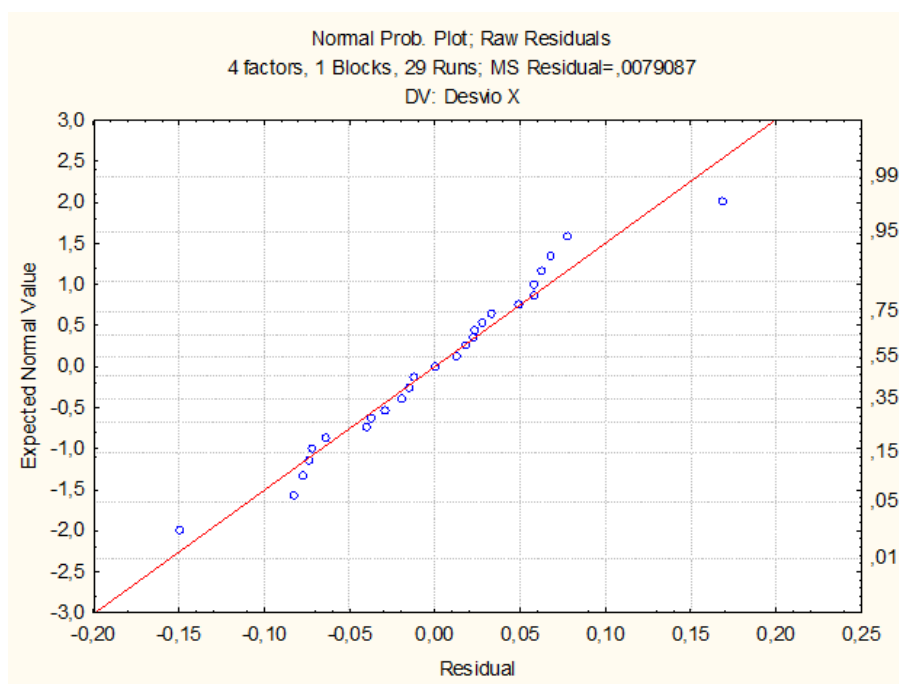


Figura D.1 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio X (Impressora: Blocks Zero)

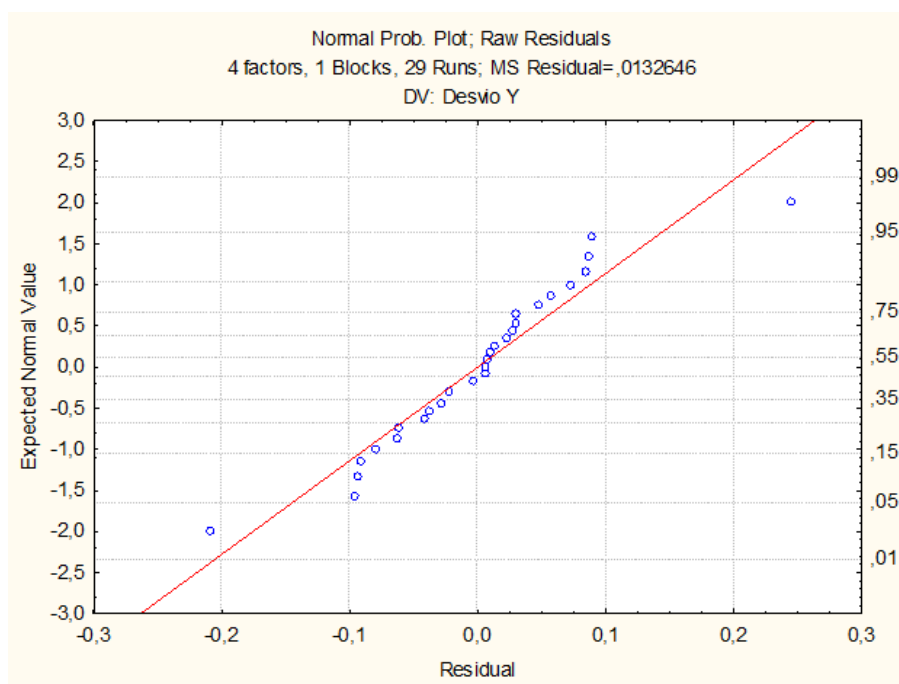


Figura D.2 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)

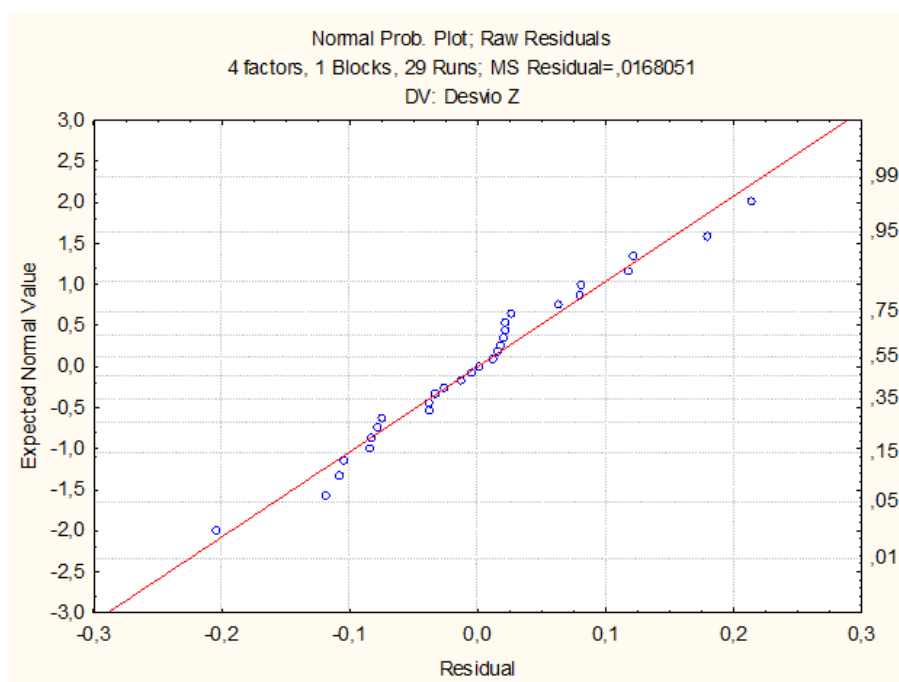


Figura D.3 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)

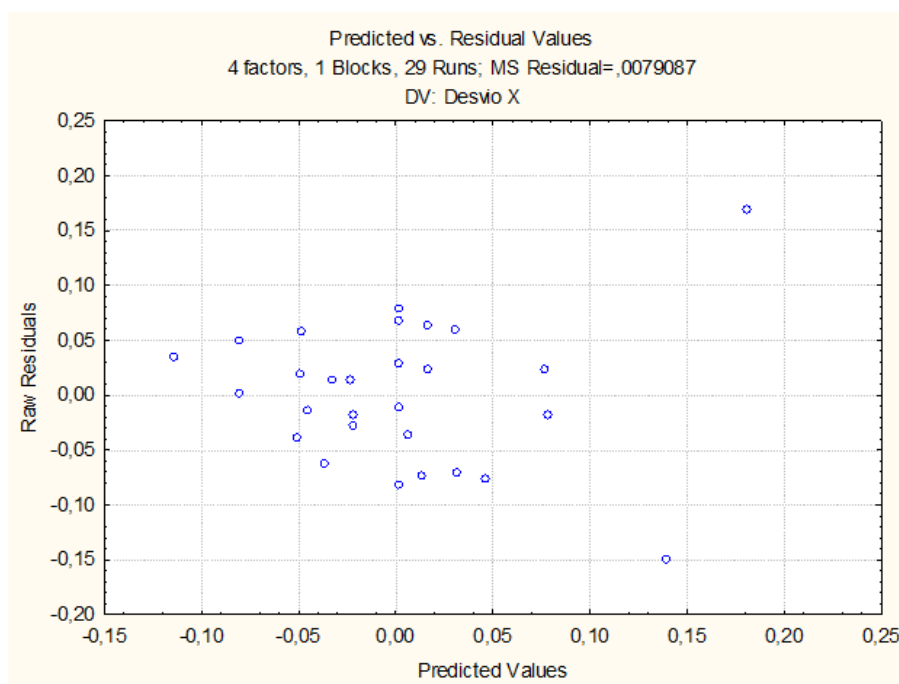


Figura D.4 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio X (Impressora: Blocks Zero)

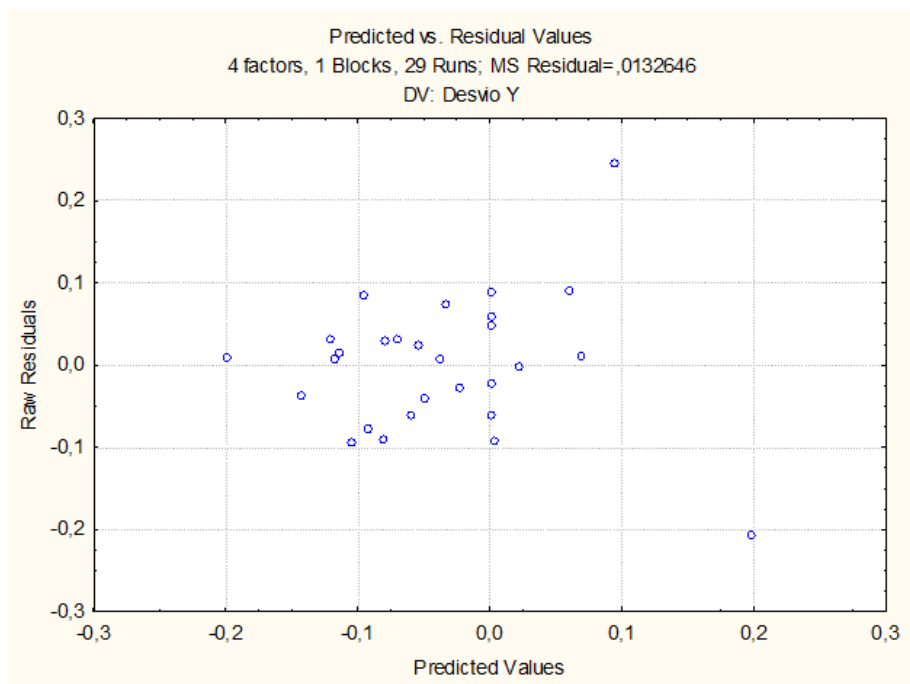


Figura D.5 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)

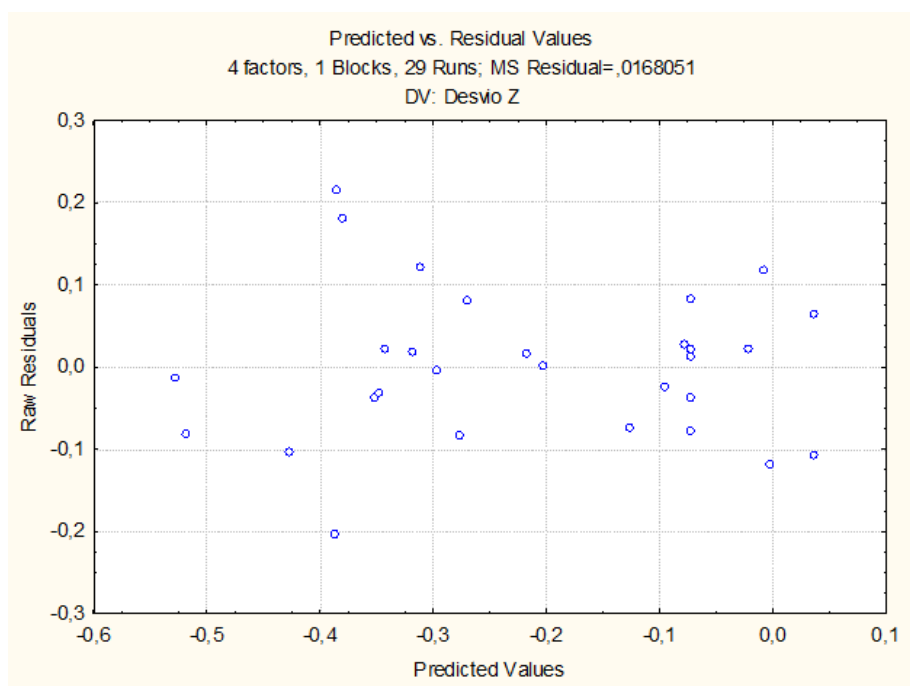


Figura D.6 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)

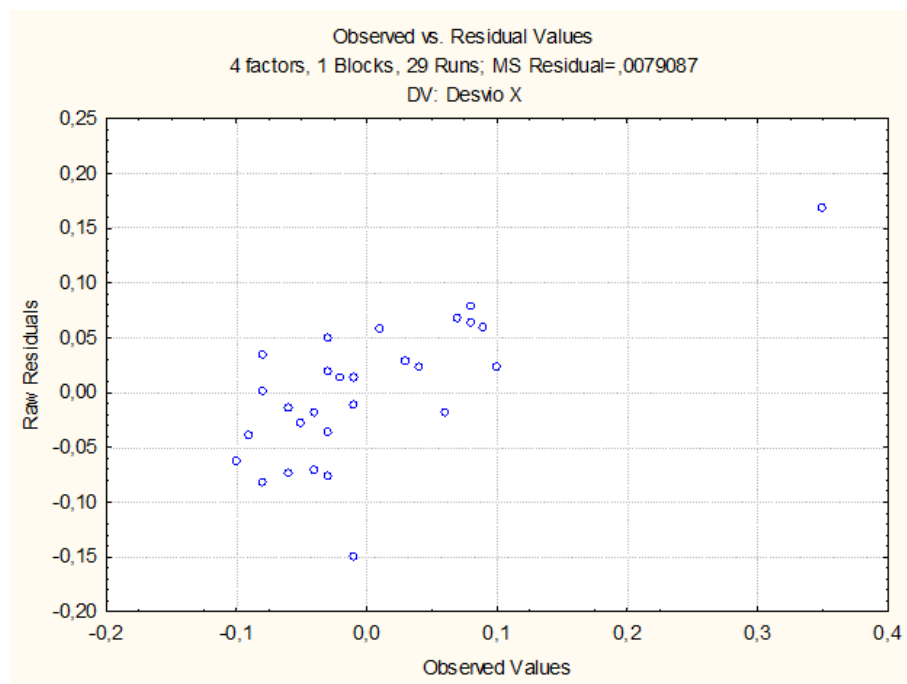


Figura D.7 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio X (Impressora: Blocks Zero)

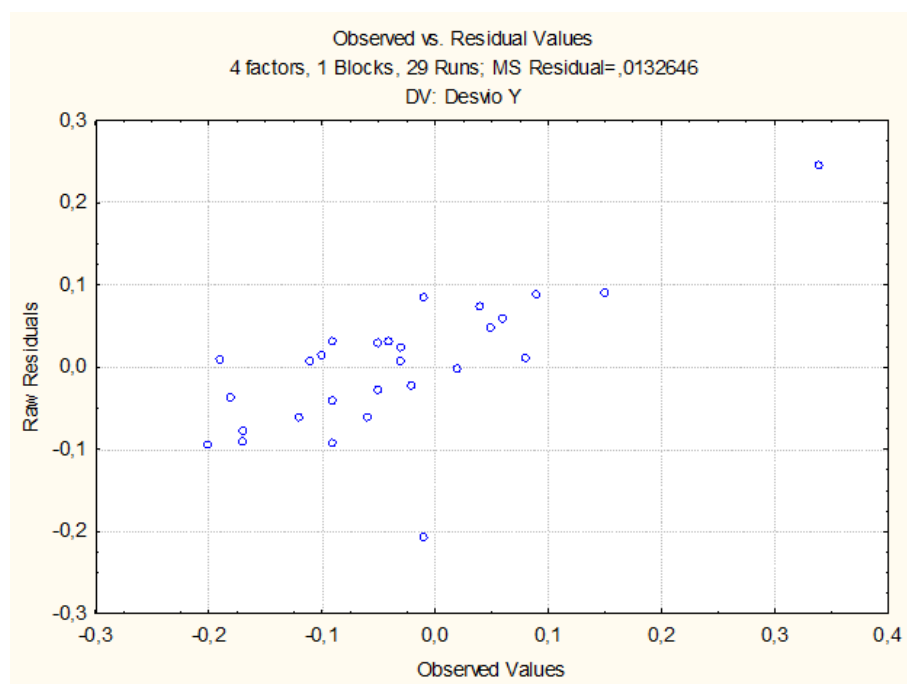


Figura D.8 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio Y (Impressora: Blocks Zero)

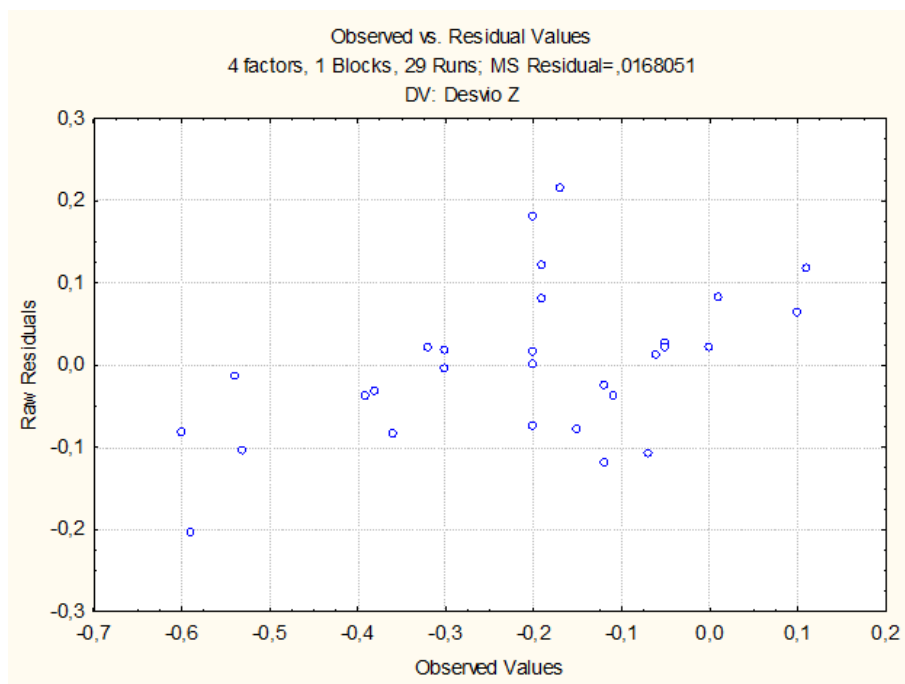


Figura D.9 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio Z (Impressora: Blocks Zero)

Os resíduos não violam o pressuposto da normalidade uma vez que se dispõem em torno da reta e nas restantes figuras estão dispersos sem seguir uma tendência pelo que se pode assumir que não houve influência de fatores externos

Anexo D.2 – Impressora: Blocks One

Tabela D.2 - Resultados experimentais obtidos para as respostas: Desvio X, Desvio Y e Desvio Z (impressora: Blocks One)

Ensaio n°	D (mm)	Ec (mm)	v (mm/s)	T (°C)	DIM X (mm)	DIM Y (mm)	DIM Z (mm)	DES X (mm)	DES Y (mm)	DES Z (mm)
1	20	0,2	70	215	20,18	20,17	20,29	0,18	0,17	0,29
2	50	0,2	70	215	49,93	49,97	50,35	-0,07	-0,03	0,35
3	20	0,1	70	215	19,96	19,99	20,14	-0,04	-0,01	0,14
4	50	0,1	70	215	49,84	49,89	50,16	-0,16	-0,11	0,16
5	20	0,2	30	215	20,11	20,14	20,34	0,11	0,14	0,34
6	50	0,2	30	215	49,86	49,89	50,38	-0,14	-0,11	0,38
7	20	0,1	30	215	19,99	19,96	20,12	-0,01	-0,04	0,12
8	50	0,1	30	215	49,85	49,88	50,1	-0,15	-0,12	0,1
9	20	0,2	70	205	20,11	20,15	20,29	0,11	0,15	0,29
10	50	0,2	70	205	49,84	49,96	50,24	-0,16	-0,04	0,24
11	20	0,1	70	205	19,95	19,96	20,13	-0,05	-0,04	0,13
12	50	0,1	70	205	49,81	49,92	50,15	-0,19	-0,08	0,15
13	20	0,2	30	205	20,07	20,12	20,33	0,07	0,12	0,33
14	50	0,2	30	205	49,85	49,98	50,37	-0,15	-0,02	0,37
15	20	0,1	30	205	19,93	19,93	20,12	-0,07	-0,07	0,12
16	50	0,1	30	205	49,83	49,89	50,14	-0,17	-0,11	0,14
17	5	0,15	50	210	5,01	5,01	4,98	0,01	0,01	-0,02
18	65	0,15	50	210	64,8	64,9	65,19	-0,2	-0,1	0,19
19	35	0,05	50	210	34,84	34,83	35,15	-0,16	-0,17	0,15
20	35	0,25	50	210	34,95	35,05	35,23	-0,05	0,05	0,23
21	35	0,15	10	210	34,93	34,98	34,85	-0,07	-0,02	0,15
22	35	0,15	90	210	35,07	35,03	35,09	0,07	0,03	0,09
23	35	0,15	50	200	34,91	34,97	35,16	-0,09	-0,03	0,16
24	35	0,15	50	220	34,93	35,04	35,15	-0,07	0,04	0,15
25*	35	0,15	50	210	34,99	35,02	35,06	-0,01	0,02	0,06
26*	35	0,15	50	210	34,96	35,02	35,2	-0,04	0,02	0,2
27*	35	0,15	50	210	34,98	35	35,11	-0,02	0	0,11
28*	35	0,15	50	210	34,95	35	35,3	-0,05	0	0,3
29*	35	0,15	50	210	35	35,01	35,09	0	0,01	0,09

*Ponto zero replicado 4 vezes

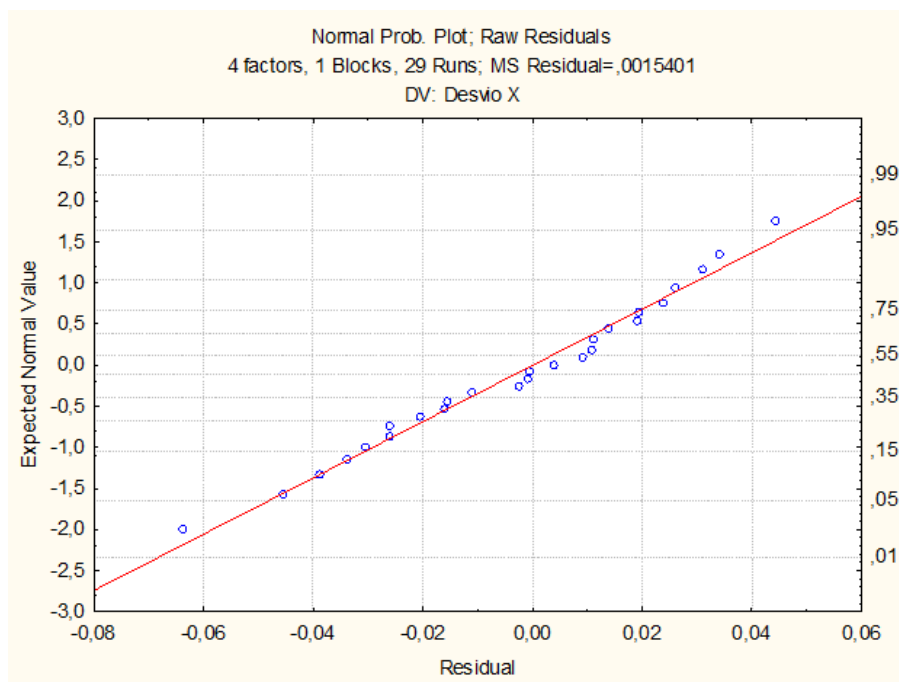


Figura D.10 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio X (Impressora: Blocks One)

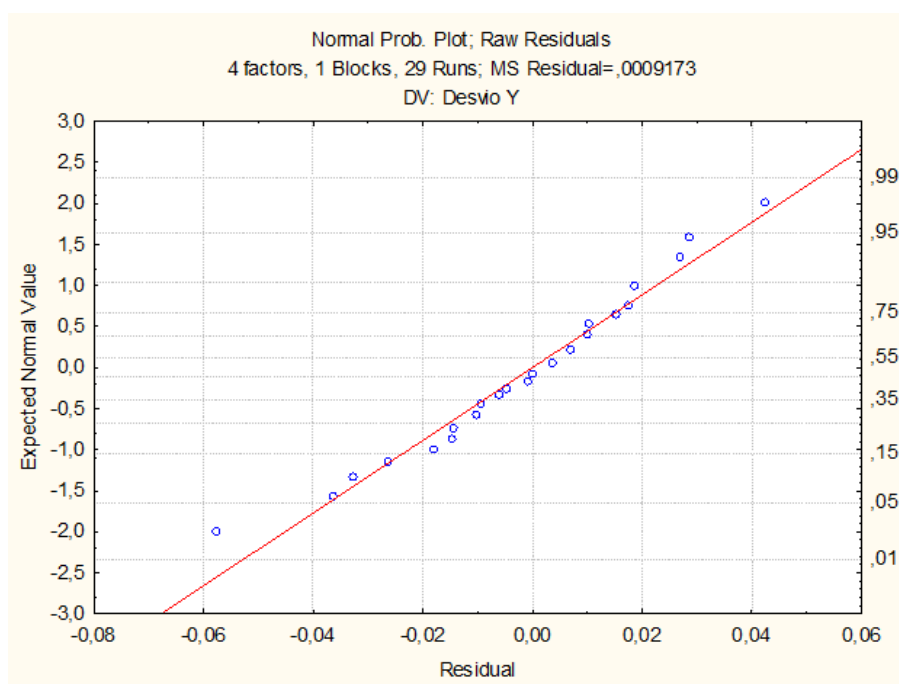


Figura D.11 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio Y (Impressora: Blocks One)

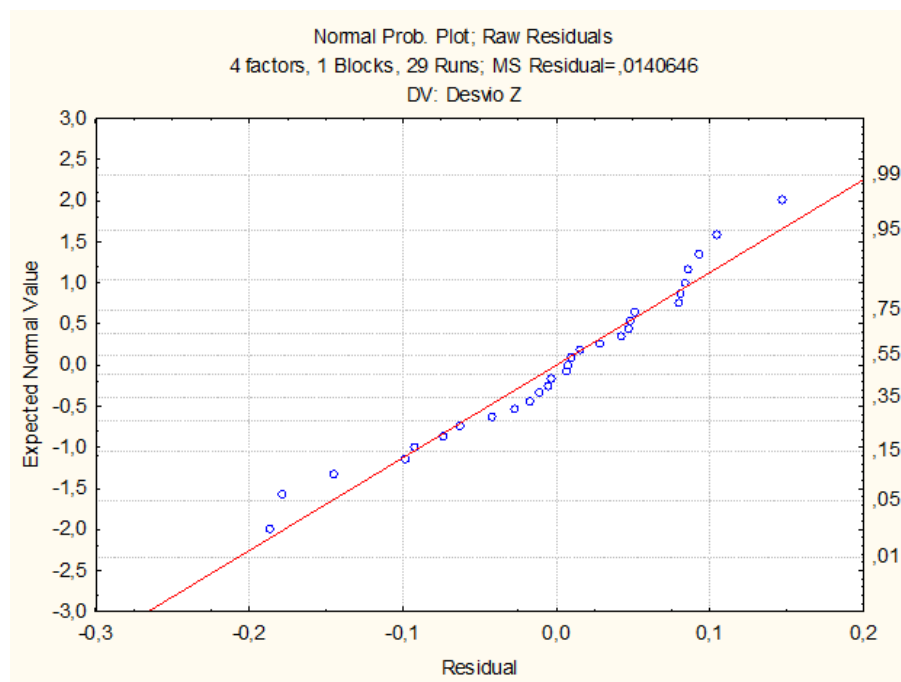


Figura D.12 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta Desvio Z (Impressora: Blocks One)

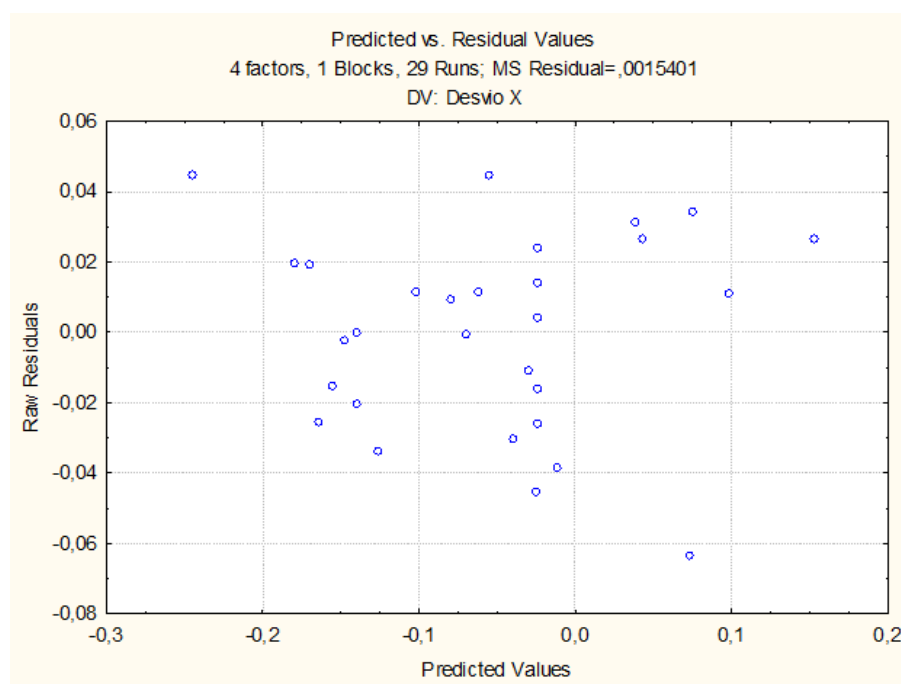


Figura D.13 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio X (Impressora: Blocks One)

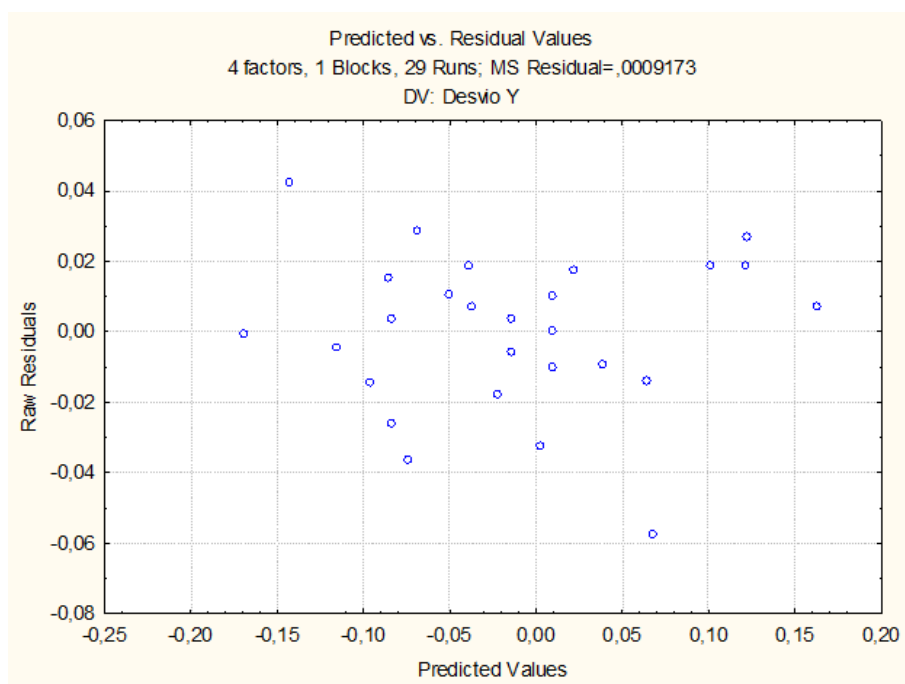


Figura D.14 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio Y (Impressora: Blocks One)

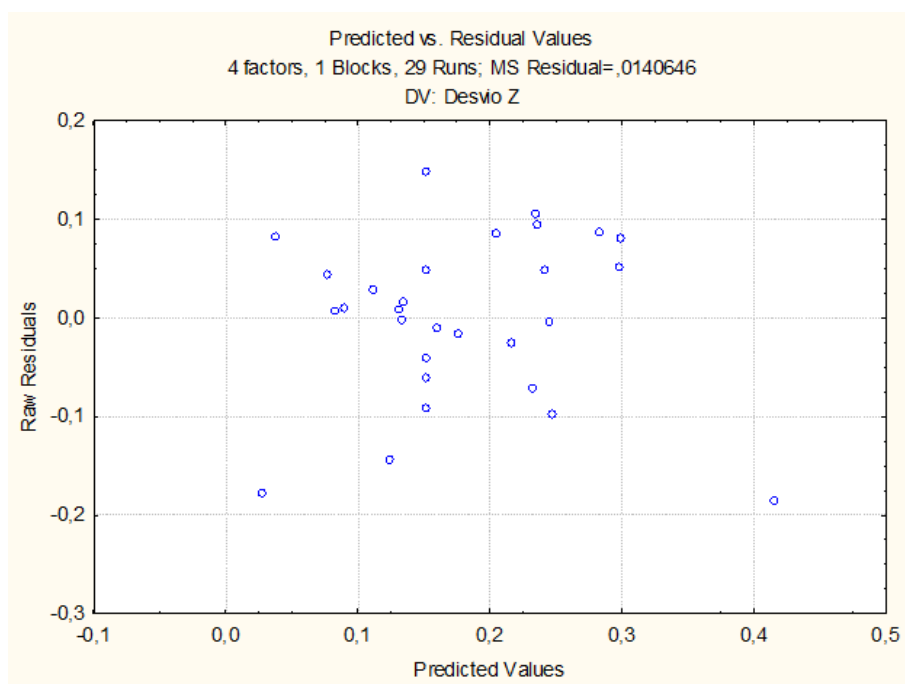


Figura D.15 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para a resposta Desvio Z (Impressora: Blocks One)

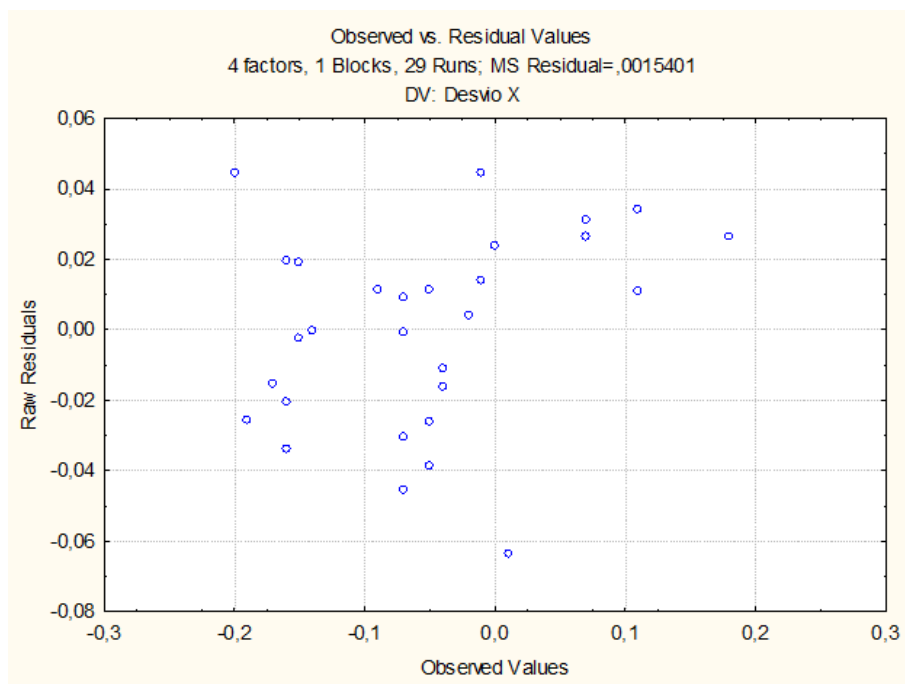


Figura D.16 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio X (Impressora: Blocks One)

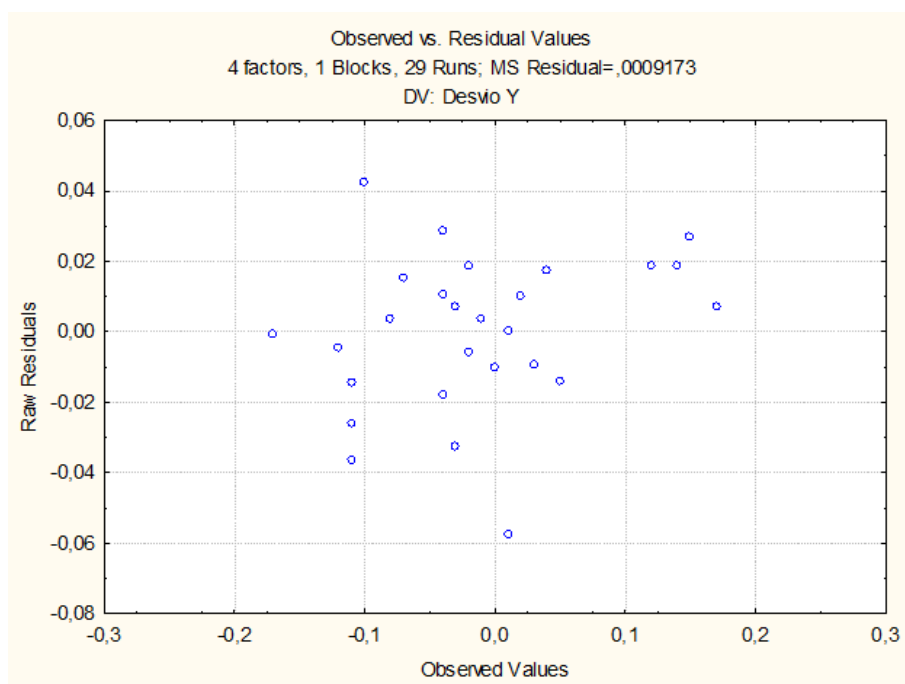


Figura D.17 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio Y (Impressora: Blocks One)

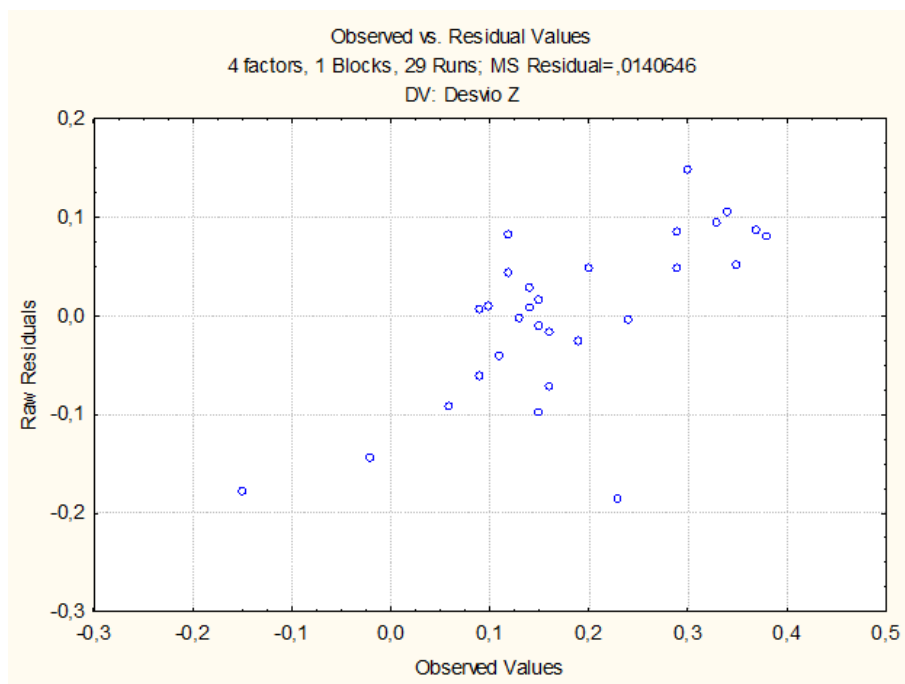


Figura D.18 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para a resposta Desvio Z (Impressora: Blocks One)

Os resíduos não violam o pressuposto da normalidade uma vez que se dispõem em torno da reta e nas restantes figuras estão dispersos sem seguir uma tendência pelo que se pode assumir que não houve influência de fatores externos

